

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

DÉVELOPPEMENT ET ÉVALUATION DES MODÈLES HAUTEUR-DIAMÈTRE
DES PINS GRIS ET DES ÉPINETTES NOIRES À L'ÉCHELLE PROVINCIALE ET
ÉCORÉGIONALE DE L'ALBERTA ET DU QUÉBEC

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN BIOLOGIE

PAR

WIDED CHOUROU

AVRIL 2014

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

J'aimerais tout d'abord exprimer mes remerciements à mon directeur de recherche, Changhui Peng, pour son appui et sa grande confiance. Ses critiques et ses conseils m'ont été précieux pour structurer le travail et l'améliorer au fil des discussions.

Merci aussi à mon collègue de laboratoire Zhihai Ma, pour sa patience et ses recommandations au niveau des analyses statistiques.

Mes remerciements vont aussi à toutes les personnes qui ont travaillé sur le terrain en Alberta et au Québec qui, sans eux, ce projet n'aurait pas vu le jour.

Je remercie infiniment monsieur Daniel Kneeshaw ainsi que monsieur Benoit St-Onge qui ont contribué, par leurs pertinents commentaires, à améliorer la qualité de ce projet de recherche.

Je tiens à exprimer ma gratitude à madame Chantal Gagné, assistante de gestion du programme des études avancées au département des sciences biologiques, pour ses encouragements, son soutien et sa gentillesse dans les durs moments que j'ai traversés.

J'exprime du fond de mon cœur mon affection à mes parents Manoubi et Néjia ainsi qu'à ma sœur Jawaher et mon frère Amine ; sans eux cette extraordinaire expérience professionnelle, culturelle et personnelle n'aurait jamais eu lieu.

Enfin, je remercie profondément mon mari, Saber Gallali, pour son soutien continu, ses encouragements, ses conseils et surtout pour sa patience dans les moments orageux.

Je dédie ce mémoire à ma sœur Raja...

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|-----|
| LISTE DES FIGURES | V |
| LISTE DES TABLEAUX..... | VII |
| RÉSUMÉ | IX |
| CHAPITRE I | |
| INTRODUCTION GÉNÉRALE | |
| 1.1 Mise en contexte | 1 |
| 1.2 État des connaissances | 5 |
| 1.2.1 Relation hauteur-diamètre | 5 |
| 1.2.2 Régionalisation des modèles hauteur-diamètre | 7 |
| 1.3 Problématique | 10 |
| CHAPITRE II | |
| MATÉRIELS ET MÉTHODES | |
| 2.1 Espèces étudiées | 13 |
| 2.2 Sites d'étude | 15 |
| 2.2.1 Placettes-échantillons permanentes (PEP): Description et distribution..... | 15 |
| 2.2.2 Écorégionalisation des PEP de l'Alberta et du Québec..... | 21 |
| 2.3 Traitement des données | 23 |
| 2.3.1 Hauteur et diamètre à hauteur de poitrine (DHP)..... | 23 |
| 2.3.3 Évaluation de la performance des modèles hauteur-diamètre | 28 |

CHAPITRE III

RÉSULTATS

| | |
|---|----|
| 3.1 Développement des modèles hauteur-diamètre | 31 |
| 3.2 Évaluation des modèles provinciaux et écorégionaux..... | 34 |
| 3.2.1 Erreurs moyennes associées à la prédiction des hauteurs..... | 41 |
| 3.2.2 Biais de prédiction des hauteurs..... | 43 |
| 3.2.3 Écarts-types des erreurs associés à la prédiction des hauteurs..... | 44 |

CHAPITRE IV

| | |
|-----------------|----|
| DISCUSSION..... | 49 |
|-----------------|----|

CHAPITRE V

| | |
|-----------------|----|
| CONCLUSION..... | 55 |
|-----------------|----|

| | |
|------------------|----|
| APPENDICE A..... | 57 |
|------------------|----|

| | |
|----------------------------------|----|
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... | 60 |
|----------------------------------|----|

LISTE DES FIGURES

| Figure | Page |
|---|------|
| 2.1 Répartition des placettes d'échantillonnage de l'épinette noire (a) et du pin gris (b) en Alberta (Google Earth, 2012) | 18 |
| 2.2 Répartition des placettes d'échantillonnage de l'épinette noire (c) et du pin gris (d) au Québec (Google Earth, 2012) | 19 |
| 3.1 Moyenne des erreurs associée aux hauteurs prédites (cm) en fonction des classes de DHP (cm) lorsque les modèles provinciaux sont associés à leur écorégions respectives | 42 |
| 3.2 Comparaison de la relation hauteur-DHP du pin gris (graphe a) et de l'épinette noire (graphe b) entre le Québec et l'Alberta..... | 45 |
| 3.3 Moyenne des écarts-types de l'erreur associée à la prédiction des hauteurs (m) en fonction de classes de DHP(cm) pour les pinèdes grises (graphes a et b) et les épinettes noires (graphes c et d) en Alberta et au Québec. Le modèle représente la moyenne des écarts-types de l'erreur de prédiction des hauteurs pour toutes les classes de DHP(cm)..... | 47 |
| 3.4 Variation de la hauteur réelle et prédite (m) en fonction du DHP (cm) du pin gris (graphes a et b) et de l'épinette noire (graphes c et d) en Alberta et au Québec | 49 |

LISTE DES TABLEAUX

| Tableau | Page |
|---|------|
| 2.1 Répartition des PEP de l'épinette noire et du pin gris au Québec | 22 |
| 2.2 Répartition des PEP de l'épinette noire et du pin gris en Alberta | 22 |
| 2.3 Données dendrométriques sur les pins gris à l'échelle écorégionale et provinciale de l'Alberta et du Québec..... | 24 |
| 2.4 Données dendrométriques sur les épinettes noires à l'échelle écorégionale et provinciale de l'Alberta et du Québec | 25 |
| 3.1 Estimation des coefficients de la fonction Chapman-Richards pour le pin gris à l'échelle écorégionale et provinciale de l'Alberta et du Québec | 32 |
| 3.2 Estimation des coefficients de la fonction Chapman-Richards pour l'épinette noire à l'échelle écorégionale et provinciale de l'Alberta et du Québec | 33 |
| 3.3 Principaux résultats statistiques lorsque les modèles provinciaux des pinèdes grises sont appliqués à leurs écorégions respectives..... | 35 |
| 3.4 Principaux résultats statistiques lorsque les modèles provinciaux des épinettes noires sont appliqués à leur écorégions respectives | 35 |
| 3.5 Principaux résultats statistiques lorsque les modèles écorégionaux albertains des pinèdes grises sont appliqués à chaque écorégion..... | 37 |
| 3.6 Principaux résultats statistiques lorsque les modèles écorégionaux albertains des épinettes noires sont appliqués à chaque écorégion | 38 |
| 3.7 Principaux résultats statistiques lorsque les modèles écorégionaux québécois des pinèdes grises sont appliqués à chaque écorégion..... | 39 |
| 3.8 Principaux résultats statistiques lorsque les modèles écorégionaux québécois des épinettes noires sont appliqués à chaque écorégion | 40 |
| 3.9 Résultats des tests statistiques relatifs à l'application des modèles provinciaux | 44 |
| A.1 Caractéristiques des écorégions albertaines (Alberta Natural Regions Committee, 2006)60 | |
| A.2 Caractéristiques des écorégions du Québec (Marshall et Schut, 1999)..... | 61 |

| | | |
|-----|-------------------------------|----|
| A.3 | Significations des codes..... | 62 |
|-----|-------------------------------|----|

RÉSUMÉ

Vingt et un modèles hauteur-diamètre ont été développés à l'échelle provinciale et écorégionale du Québec et de l'Alberta pour les pinèdes grises et les épinettes noires. La fonction non linéaire de Chapman-Richards s'est bien ajustée aux données dendrométriques des espèces concernées par cette étude. En effet, le R^2 exprime au moins 89% de la variation totale de la hauteur pour les pinèdes grises au Québec et en Alberta et au moins 94% de la variation totale de la hauteur des épinettes noires dans ces deux provinces. Les résultats obtenus de la présente étude montrent d'une part, que les modèles hauteur-diamètre conçus à l'échelle provinciale s'avèrent être imprécis à l'échelle écorégionale et d'autre part, que l'application inadéquate des modèles écorégionaux engendre des biais et des erreurs associés à la prédiction de la hauteur des peuplements étudiés. Néanmoins, un modèle écorégional est précis lorsqu'il est utilisé uniquement pour prédire la hauteur dans l'écorégion où il a été paramétré. Ces constatations suggèrent que les modèles hauteur-diamètre sont fortement dépendants des variations environnementales. En effet, la relation hauteur-diamètre des pinèdes grises et des épinettes noires n'est pas identique pour les deux provinces et ces deux espèces semblent mieux croître en Alberta. D'ailleurs, le test d'inversion des modèles provinciaux a généré d'importants biais liés à la prédiction des hauteurs. Ce test étant pionnier dans le domaine forestier a montré que l'utilisation d'un modèle dans une région où il n'a pas été paramétré engendre des prédictions biaisées de la hauteur des peuplements considérés par cette étude.

Mots clés : Modèle hauteur-diamètre, fonction non linéaire Chapman-Richards, écorégions, provinces, biais et erreurs de prédictions, test d'inversion.

CHAPITRE I

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 Mise en contexte

La modélisation, par définition, est un processus qui réduit une réalité ambiguë à un système de relations bien agencé afin d'atteindre un but bien précis (Bouchon, 1995).

La modélisation forestière, quant à elle, a connu depuis les dernières décennies une importante progression qui a généré plusieurs modèles, ces derniers diffèrent selon l'unité de base utilisée (Pothier et Savard, 1998).

Dhôte (1987) a classé la modélisation forestière selon trois approches qui sont : l'approche empirique, l'approche théorique et l'approche semi-empirique.

Dans le cadre de la présente recherche, l'approche utilisée est dite empirique. Celle-ci prend en considération les variables les plus explicatives du modèle utilisé et vise à ajuster les équations de régression afin qu'ils conviennent le mieux possible à la structure des données dendrométriques. Elle se base, donc, sur des modèles précis contrairement à l'approche théorique qui conduit fréquemment à des modèles bien plus complexes et assez peu pratiques et à l'approche semi-empirique qui s'intéresse particulièrement à l'importance de la concurrence exercée sur les arbres (Bouchon, 1995 ; Pavé, 1994).

Par ailleurs, selon Bouchon (1995) un modèle empirique est dit dendrométrique lorsque les mesures dendrométriques prélevées à partir de placettes permanentes ou de données d'inventaire, telles que les tables de productions de la gestion forestière qui rendent compte des phénomènes observés en prenant en considération, implicitement, les mécanismes de croissances qui les génèrent. Par conséquent, les modèles dendrométriques sont la base de la gestion forestière tel que le modèle hauteur-diamètre qui illustre la relation entre ces deux variables et qui est le plus utilisé pour déterminer par exemple le volume des arbres, la biomasse et autres variables jugées fondamentales pour l'inventaire sylvicole (Peng, Zhang et Liu, 2001 ; Peng *et al.*, 2004). Ainsi, le modèle dendrométrique, utilisé dans cette recherche, est basé, selon Houllier, Bouchon et Birot (1991), sur une relation allométrique qui prend en considération la hauteur, le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) des arbres ainsi que les coefficients de l'équation à développer.

La gestion des ressources forestières repose essentiellement sur la capacité de prévoir la croissance et le rendement des forêts. Dans les forêts complexes où les arbres sont de différents âges, tailles et vigueur, les prévisions de rendement sont plus difficiles que dans les peuplements uniformes. En effet, dans les peuplements irréguliers, les relations individuelles hauteur-diamètre des arbres sont souvent complexes à cause de la dynamique des peuplements forestiers (Oliver et Larson, 1990 ; Temesgen et Gadow, 2004).

Une estimation précise de la hauteur totale de l'arbre est souvent nécessaire dans la gestion des forêts. Celle-ci représente un élément important dans les inventaires forestiers, par exemple, l'estimation de la hauteur sert à prédire le volume total et marchand des arbres (Soares et Tomé, 2002) et est très utile dans les systèmes de tronçonnage (Epstein *et al.*, 1999). Ainsi, les modèles de croissance et de rendement prévoient souvent la productivité des peuplements en utilisant la mesure de la hauteur dominante (Avery et Burkhart, 1983).

Plusieurs chercheurs comme Huang, Titus et Wiens (1992), Pothier et Savard (1998) et Peng (1999) ont adopté la modélisation forestière afin de prédire les hauteurs de plusieurs

peuplements forestiers à partir du diamètre à hauteur de poitrine (DHP) pour plusieurs provinces canadiennes.

Par ailleurs, le développement des modèles hauteur-diamètre se base sur des fonctions qui peuvent être linéaires ou non. Par exemple, les études effectuées par Huang, Titus et Wiens (1992) Zhang, Moore et Newberry (1995), Peng, Zhang et Liu (2001) ont démontré, à l'unanimité, que la fonction non linéaire de Chapman-Richards (Chapman, 1961 ; Richards, 1959) est l'une des fonctions non linéaires les plus pertinentes pour décrire la relation hauteur-DHP pour de nombreuses espèces forestières. En effet, quelques chercheurs ont testé différentes fonctions non linéaires pour des espèces forestières, notamment pour le pin gris et l'épinette noire, et ont conclu que la fonction Chapman-Richards est la meilleure dans la prédiction de la hauteur à partir du DHP pour ces deux espèces en Ontario (Peng, 1999 ; Peng, Zhang et Liu, 2001). Bien que ces chercheurs aient démontré la performance de la fonction non linéaire de Chapman-Richard, d'autres scientifiques continuent à utiliser les fonctions linéaires telle que l'étude de Fortin *et al.* (2009) ; pourtant les processus biologiques sont de nature non linéaires (Pavé, 1994), par exemple, la densité des peuplements forestiers affecte, d'une manière non linéaire, la croissance en diamètre des arbres (Mason, 2004). D'ailleurs, Fortin *et al.* (2009) reconnaissent l'aspect simpliste de leur modèle hauteur-diamètre linéaire développé pour vingt espèces forestières au Québec.

D'autre part, plusieurs modélisateurs ont développé des modèles hauteur-DHP à différentes échelles. À titre d'exemple, la récente étude de Rijal, Weiskittel et Kershaw (2012) est axée sur le développement d'un modèle hauteur-diamètre généralisé pour les régions acadiennes de l'Amérique du Nord. Huang, Titus et Wiens (1992) ont développé un modèle provincial pour les principales espèces de l'Alberta. Quant à l'étude de Peng *et al.* (2004), elle a fait l'objet de développement d'un modèle provincial ainsi que de modèles régionaux et écorégionaux pour l'Ontario. D'un autre côté, il est connu que la relation hauteur-diamètre dépend fortement des conditions environnementales locales et que les modèles développés à petites échelles ont une meilleure capacité prédictive de la hauteur que les modèles généralisés (modèles développés pour un ensemble de régions ou à l'échelle nationale) (Peng

et al., 2001). Malgré cela, les gestionnaires forestiers continuent à utiliser des modèles à l'échelle nationale canadienne, telles que les équations de la biomasse qui utilisent comme variable explicative la hauteur et le diamètre des arbres (Ung, Bernier et Guo, 2008).

Par ailleurs, une étude intéressante de Peng *et al.* (2001) a fait l'objet d'une comparaison de relations hauteur-diamètre, pour le pinède grises et les épinettes noires, afin de montrer qu'il existe réellement des différences de prédiction de la hauteur de ces deux espèces à l'échelle écorégionale de l'Ontario. D'autre part, l'étude de Feldpausch *et al.* (2011) s'est axée sur la comparaison de la relation hauteur-diamètre de différentes espèces forestières à travers quatre continents dans le but d'illustrer les importantes variations qui régissent cette relation à grandes échelles.

À notre connaissance, la comparaison de la relation hauteur-diamètre des espèces forestières à grande échelle n'a jamais fait l'objet d'études canadiennes, ce qui procure à la présente recherche un aspect pionnier dans le domaine de la gestion forestière canadienne. De plus, il n'y a pas eu de développement de modèles écorégionaux québécois et albertains grâce à la fonction non linéaire de Chapman-Richards pour l'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.) et le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb) qui sont les deux espèces les plus importantes au Canada autant sur le plan économique qu'écologique (Farrar, 1995 ; Gagnon et Morin, 2001). Par conséquent, la présente recherche innove en focalisant sur le développement des modèles hauteur-diamètre provinciaux et écorégionaux pour le Québec et l'Alberta ; en utilisant, d'une part, une grande base de données d'inventaire qui s'étalent de 1990 jusqu'à 2005 pour l'épinette noire et le pin gris et d'autre part, le développement de ces modèles se base sur la fonction non linéaire de Chapman-Richards. Les modèles établis par cette recherche ont été, par la suite, évalués dans le but de tester leur performance à différentes échelles.

En prenant en considération toutes ces constations, nous visons dans la présente contribution à fournir aux gestionnaires forestiers des modèles non linéaires, aussi modestes qu'ils soient, développés à différentes échelles du Québec et de l'Alberta ainsi qu'une comparaison de la

relation hauteur-diamètre des pinèdes grises et des épinettes noires entre ces deux provinces dans le but de savoir s'il existe ou non des variations de la relation hauteur-diamètre de ces deux espèces à travers de grandes échelles.

1.2 État des connaissances

1.2.1 Relation hauteur-diamètre

De nombreux modèles de croissance et de rendement nécessitent les mesures de la hauteur et du diamètre en tant que variables d'entrée de base. Pour prédire la hauteur totale des arbres, l'utilisation des mesures des diamètres peut être totale ou partielle (Burkhart *et al.*, 1972 ; Huang, Titus et Wiens, 1992 ; Wykoff, Crookston et Stage, 1982). Lorsque les mesures réelles de la hauteur ne sont pas disponibles, les fonctions allométriques hauteur-diamètre peuvent être utilisées pour prédire indirectement la croissance en hauteur (Larsen et Hann, 1987).

Une fonction généralisée hauteur-diamètre estime la relation spécifique entre la hauteur des arbres individuels et des diamètres en utilisant des variables telles que la surface terrière par hectare et le diamètre quadratique moyen. En Europe, les fonctions généralisées hauteur-diamètre, désignées par le terme « Einheit Höhenkurven » dans la langue allemande, ont été utilisées depuis 1930 (Temesgen et Gadow, 2004).

Généralement, les relations hauteur-diamètre sont appliquées à des forêts équiennes et peuvent se baser sur des fonctions linéaires (Johnson, 1949 ; Sánchez *et al.*, 2003) mais également sur des fonctions non linéaires (Huang, Titus et Wiens, 1992). Cependant, les courbes hauteur-diamètre ainsi obtenues pour les peuplements ne sont pas bien adaptées à toutes les conditions de développement susceptibles d'exister dans un peuplement donné. Par conséquent, dans les forêts inéquiennes, où il y a une grande variation d'âge, de qualité et de densité des arbres, une relation unique hauteur-diamètre pour l'ensemble de son peuplement serait le résultat de nombreuses relations hauteur-diamètre, avec une forte variabilité autour de la ligne de régression. Dans de tels cas et dans le but de réduire l'erreur due à l'estimation

des hauteurs, l'utilisation du modèle hauteur-diamètre généralisé est recommandée afin de modéliser les changements de la relation entre ces deux variables en fonction du temps (Sánchez *et al.*, 2003). Par conséquent, ces modèles sont utilisés dans l'analyse des placettes-échantillons permanentes (PEP) et dans les études de croissance et de rendement (Assmann, 1970 ; Lynch et Murphy, 1995). De ce fait, le développement de modèles simples et précis, permettant aux gestionnaires forestiers de déterminer avec fiabilité la hauteur des arbres dans un peuplement à partir du diamètre, est un objectif primordial dans la gestion forestière. La connaissance de la relation entre ces deux variables permet aux gestionnaires sylvicoles d'éviter d'importants investissements financiers dans les mesures de la hauteur dans le but d'obtenir les valeurs d'entrées nécessaires pour estimer le volume des arbres, la hauteur dominante des peuplements, les indices de la concurrence pour la croissance individuelle des arbres et les indices de diversité structurelle (Calama et Montero, 2004). Pour toutes ces raisons, la relation hauteur-diamètre est utilisée dans différents modèles de croissances (Lynch *et al.*, 1999) afin de déterminer les hauteurs des arbres à partir du diamètre à hauteur de poitrine (DHP) ou alors prédire le DHP à partir des hauteurs des arbres (Westfall, Burkhardt et Lee, 2004) pour ensuite calculer le volume de l'arbre ainsi que la biomasse (Clutter *et al.*, 1983).

Les mesures des hauteurs et des DHP des peuplements forestiers sont également utiles pour prendre des décisions de gestion et de planification d'activités telles que l'éclaircissage, la récolte, ou encore l'amélioration de l'habitat (Sabatia et Burkhardt, 2013). Les hauteurs des arbres sont utilisées pour estimer le volume du bois, l'indice de qualité de station, le rendement, la succession, les modèles du bilan de carbone et d'autres variables jugées fondamentales pour la croissance des peuplements forestiers (Peng, Zhang et Liu, 2001).

Puisque le DHP est facile à mesurer, la hauteur peut être prélevée à partir de placettes-échantillons. Ainsi, les fonctions hauteur-diamètre seront utilisées pour prédire les hauteurs des arbres restants, réduisant de ce fait le coût d'acquisition des données. Par conséquent, le développement des modèles hauteur-diamètre est considéré comme étant l'élément le plus important dans la planification et le suivi de la gestion des forêts (Ige, Akinyemi et Smith,

2013). Plusieurs fonctions hauteur-diamètre ont été développées à partir du DHP comme, par exemple, dans les études réalisées par Huang, Titus et Wiens (1992), Moore, Zhang et Stuck (1996), Zhang (1997), Peng (1999), Peng *et al.* (2001) et Robinson et Wykoff (2004).

1.2.2 Régionalisation des modèles hauteur-diamètre

Plusieurs provinces canadiennes ont adopté l'écorégionalisation forestière dans le but de comprendre la distribution des ressources sylvicoles. À titre d'exemple, l'Alberta a pris les devants en adoptant des principes écologiques pour la gestion forestière. Ainsi, un nouveau système de classification élaboré par Strong et Leggat (1992) et Alberta Environmental protection (1994) basé sur l'écorégionalisation a été fréquemment utilisé dans la gestion forestière ainsi que dans les travaux de recherches sylvicoles (Archibald, Klappstein et Corns, 1996 ; Huang, 1994 ; Huang *et al.*, 1997). Huang, Price et Titus (2000) considèrent qu'il est primordial de développer les relations entre la croissance et le rendement tout en se conformant à ce nouveau système de classification et ce dans le but de comprendre les différences entre ces relations à travers chaque écorégion. D'autre part, Dorado *et al.* (2005) rapportent que Curtis (1967); Zhang, Burkhart et Amateis (1997); Schröder et González (2001) et Sánchez *et al.* (2003) affirment que la relation hauteur-diamètre dépend fortement des conditions environnementales qui agissent sur les peuplements forestiers. Ces chercheurs considèrent que les courbes hauteur-diamètre ne s'adaptent pas vraiment aux différentes variations environnementales au sein d'une forêt donnée. C'est pour cette raison qu'il a été jugé nécessaire de développer différentes courbes hauteur-diamètre propre à chaque peuplement. Généralement, cette relation peut être améliorée en tenant compte des variables des peuplements étudiés ; ce qui permettra au modèle développé de prendre en considération la dynamique de chaque peuplement forestier (Curtis, 1967 ; Dorado *et al.*, 2005 ; Larsen et Hann, 1987 ; Sánchez *et al.*, 2003 ; Sharma et Zhang, 2004).

Par ailleurs, Calama et Montero (2004) considèrent que la relation existant entre le diamètre d'un arbre et sa hauteur varie non seulement en fonction des structures forestières mais

qu'elle dépend également de l'environnement de croissance des peuplements (Sharma et Zhang, 2004). Conséquemment, pour une certaine hauteur, les arbres qui poussent dans les peuplements de haute densité auront des diamètres plus petits par rapport à ceux qui poussent au sein des peuplements moins denses ; les petits diamètres étant dus à la concurrence entre les arbres (Calama et Montero, 2004 ; Sánchez *et al.*, 2003). De plus, Curtis (1967) pense que la relation hauteur-diamètre n'est pas constante dans le temps au sein d'un même peuplement. Tous ces facteurs indiquent que des variables complémentaires sont nécessaires pour développer des modèles généralisés hauteur-diamètre (Temesgen et Gadow, 2004). Par contre, une approche très intéressante de Huang, Price et Titus (2000) montre qu'il n'est pas nécessaire de faire des mesures supplémentaires pour la prédiction des variables d'un peuplement donné. Toutefois, il est nécessaire de classer la zone d'étude dans des zones écologiquement homogènes puis spécifier un ensemble unique de paramètres pour chaque région d'étude. Trincado, VanderSchaaf et Burkhart (2007) partagent également le même avis que Huang, Price et Titus (2000) puisqu'il croient que le développement d'un modèle mixte qui tient compte des variables régionales peut être très intéressant. En effet, ces chercheurs pensent que la mesure de la hauteur totale d'un échantillon d'arbres peut calibrer la courbe hauteur-diamètre à l'échelle des placettes-échantillons et par conséquent éviter d'utiliser des variables prédictives complémentaires dans le modèle développé. L'avantage d'un tel procédé consiste à concevoir un modèle simple qui suppose que la relation hauteur-diamètre est variable pour un peuplement donné, permettant de cette manière le développement des courbes hauteur-diamètre spécifiques à chaque placette-échantillon (Trincado, VanderSchaaf et Burkhart, 2007). De plus, la théorie des variables régionalisées de Journel et Huijbregts (1978) offre des bases théoriques sur lesquelles des prédictions non biaisées peuvent être faites tout en minimisant et en quantifiant l'erreur de prédiction.

Pour mieux comprendre l'importance de la régionalisation des modèles hauteur-diamètre, il est essentiel de se pencher sur quelques études qui ont adopté cette théorie et d'analyser la pertinence des résultats obtenus. À titre d'exemple, la publication de Trincado, VanderSchaaf et Burkhart (2007), propose un modèle hauteur-diamètre pour les pinèdes blanches dans le

Sud-Est américain. Le test des paramètres régionaux a révélé que le développement d'un modèle pour le piémont et d'un second modèle pour les régions naturelles de la plaine côtière américaine ont été nécessaires. Effectivement, selon cette étude, le calcul du biais de prédiction ainsi que l'erreur quadratique moyenne a confirmé que l'utilisation des paramètres aléatoires augmente considérablement la capacité prédictive des deux modèles développés. Une autre étude de Zeide et Vanderschaaf (2002) qui vient appuyer celle de Trincado, VanderSchaaf et Burkhart (2007) suggère que les modèles mixtes décrivent mieux les courbes hauteur-diamètre et mettent en évidence, d'une façon indirecte, les impacts de la densité des peuplements sur la relation hauteur-diamètre des arbres.

Par ailleurs, la régionalisation des modèles hauteur-diamètre ne révèle pas uniquement l'importance de la densité des peuplements par sites d'étude ou encore par placette-échantillons mais elle démontre également que les effets des conditions environnementales influencent la capacité prédictive des modèles. En effet, les résultats trouvés par Peng *et al.* (2001) suggèrent que le climat ou encore le sol, entre autres, jouent un rôle important dans la relation hauteur-diamètre des pinèdes grises et des épinettes noires à l'échelle écorégionale de l'Ontario. En effet, cette recherche a montré d'importantes variations dans la relation hauteur-diamètre puisque ce modèle dit écorégional procure des prédictions plus précises de la hauteur et du volume de ces espèces comparé aux deux modèles régional et provincial. De plus, une étude sur le développement du modèle écorégional du pin tordu en Alberta prend en considération les paramètres environnementaux tels que la température, la composition du sol et l'altitude en confirmant ainsi qu'il est préférable de développer les modèles hauteur-diamètre par écorégion (Huang, 1999).

Une autre recherche met en évidence l'effet important de l'altitude sur la prédiction de la hauteur des arbres dans la forêt tropicale humide au Sud-Est du Brésil. En effet, le développement d'un modèle local tenant compte de l'altitude spécifique de cette région a produit des résultats plus pertinents qu'un modèle généralisé. Par conséquent, il est clair que le développement des modèles régionaux qui prédisent la hauteur des arbres à partir d'un

échantillonnage aléatoire représente une approche complémentaire aux études qui se basent uniquement sur les mesures des diamètres des arbres (Scaranello *et al.*, 2012).

1.3 Problématique

La hauteur totale de l'arbre comme son diamètre à hauteur de poitrine (DHP) sont deux variables fondamentales pour le développement des modèles de croissance et de rendement des forêts (Vancley, 1994 ; Wykoff, Crookston et Stage, 1982). Étant donné qu'il existe une relation allométrique entre ces deux variables et que les mesures des hauteurs sont coûteuses et imprécises (Peng, Zhang et Liu, 2001), les modélisateurs ont opté pour la mesure des DHP de tous les arbres de la placette-échantillon tout en limitant la mesure de la hauteur à un sous-échantillon d'arbres. Par la suite, le modèle hauteur-DHP a été développé en fonction des hauteurs des arbres échantillonnés dans le but de prédire les hauteurs manquantes (Arcangeli *et al.*, 2013). Rijal, Weiskittel et Kershaw (2012) pensent que la prévision de l'évolution des peuplements dans le temps doit s'appuyer sur ces modèles tout en fournissant, dans la mesure du possible, une prédiction précise de la hauteur des arbres. De ce fait, le développement des modèles hauteur-diamètre est considéré comme étant l'élément le plus important dans la planification et le suivi de la gestion sylvicole (Ige, Akinyemi et Smith, 2013).

Dans ce qui suit nous allons montrer que plusieurs études font l'objet d'analyses contradictoires quant au développement et à la performance des modèles hauteur-DHP à différentes échelles.

En effet, plusieurs modèles hauteur-DHP ont été développés, en se basant sur de multiples approches et fonctions de modélisation afin de caractériser la relation qui existe entre la hauteur et le DHP (Arcangeli *et al.*, 2013). Par ailleurs, il a été démontré, que cette relation dépend fortement des conditions environnementales des peuplements forestiers (Huang, Price et Titus, 2000). Cependant, Sánchez *et al.* (2003) pensent que dans les forêts inéquiennes, où il y a une grande variation d'âge, de qualité et de densité des arbres, une relation unique

hauteur-diamètre pour l'ensemble de leur peuplement serait le résultat de nombreuses relations hauteur-DHP avec une forte variabilité autour de la ligne de régression. Dans de tels cas et dans le but de réduire l'erreur résultant de l'estimation des hauteurs, l'utilisation du modèle hauteur-DHP généralisé est recommandée par ces chercheurs afin de modéliser les changements dans la relation entre ces deux variables au fil du temps. Arcangeli *et al.* (2013), quant à eux, pensent que les modèles hauteur-DHP qui prennent en considération le DHP en tant qu'unique variable explicative sont généralement précis à l'échelle régionale et fournissent des prédictions non biaisées de la hauteur des arbres. Mais ces chercheurs considèrent que ce type de modèles implique une procédure coûteuse et parfois impossible à réaliser et suggèrent fortement l'utilisation des modèles généralisés en tenant compte des variables complémentaires tels que la surface terrière et l'âge des peuplements. Par ailleurs, l'étude de Peng *et al.* (2001) a fait l'objet d'un développement de modèles hauteur-DHP pour les pinèdes grises et les épinettes noires, à l'échelle provinciale, régionale et écorégionale de l'Ontario. Cette étude a démontré que les modèles écorégionaux donnent des prédictions précises de la hauteur plus que le modèle régional et provincial. Ces chercheurs pensent également que les modèles provinciaux hauteur-DHP ne tiennent pas compte des effets des facteurs climatiques et écologiques qui diffèrent selon les régions et donc ne sont appropriés que pour prédire la hauteur des arbres à l'échelle provinciale.

Par ailleurs, étant donné que la hauteur est utilisée comme variable explicative pour la modélisation des équations de la biomasse aérienne des arbres (Case et Hall, 2008), lesdites équations sont généralement utilisées à l'échelle nationale canadienne. À titre d'exemple, Lambert, Ung et Raulier (2005) ont développé une équation de la biomasse à l'échelle nationale canadienne en tenant compte des régions qui n'ont pas été paramétrées. L'étude de Ung, Bernier et Guo (2008) bonifie la recherche de Lambert, Ung et Raulier (2005) en incluant les données dendrométriques de la Colombie-Britannique pour développer l'équation de la biomasse à l'échelle nationale tout en tenant compte des hauteurs des peuplements comme variable explicative. Ung, Bernier et Guo (2008) affirment qu'il est possible d'utiliser cette équation à l'échelle régionale canadienne. Selon ces scientifiques, l'équation

développée à l'échelle nationale offre une alternative intéressante pour les régions qui n'ont pas été paramétrées. Toutefois, cette initiative a été discutée sur le plan théorique uniquement. En effet, Ung, Bernier et Guo (2008) ont reconnu la nécessité d'une recherche plus poussée pour tester cette théorie. D'un autre côté, (Benzie, 2013) pense que les mesures de la hauteur des arbres peuvent être combinées à des données complémentaires pour faire des estimations régionales de la biomasse et pour permettre ainsi sa prédiction à l'échelle nationale. Molto *et al.* (2013), quant à eux, pensent que la relation hauteur-diamètre varie entre les sites et affecte par conséquent les estimations de la biomasse aérienne.

À la lumière de ces publications scientifiques, l'Alberta et le Québec représentent deux provinces idéales vu leurs différentes conditions environnementales permettant l'étude de la modélisation de la relation hauteur-DHP pour les pinèdes grises et les épinettes noires. De plus, à notre connaissance, ces deux provinces n'ont pas fait l'objet de développement de modèles écorégionaux. Par conséquent, le but de cette étude est, dans un premier lieu, de développer et d'évaluer les modèles hauteur-DHP des pinèdes grises et des épinettes noires à l'échelle provinciale et écorégionale de l'Alberta et du Québec et dans un second lieu, de comparer la relation hauteur-DHP entre les deux provinces (Est versus Ouest).

De ce fait, la présente étude se veut une réponse aux questions de recherche qui suivent : Quelle est la performance des modèles développés ? Les modèles provinciaux albertain et québécois vont-ils être biaisés à l'échelle écorégionale ?

Ainsi, il découle de cette problématique les hypothèses suivantes : (i) La relation hauteur-DHP des épinettes noires et des pinèdes grises en Alberta et au Québec n'est pas identique. (ii) L'utilisation du modèle albertain à l'échelle québécoise et inversement, pour les mêmes espèces, va engendrer des biais et des erreurs de prédiction de la hauteur des peuplements étudiés.

CHAPITRE II

MATERIELS ET METHODES

2.1 Espèces étudiées

Le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) est un conifère dont l'aire de répartition couvre une grande partie du Canada. Les pinèdes grises représentent l'espèce de pin la plus commune au Canada et sont présents de la Nouvelle-Écosse jusqu'en Colombie-Britannique (Cayford *et al.*, 1983). Le pin gris est surtout présent au Nord-Est de l'Alberta (Brandt, 1998) où la forêt boréale couvre 8 % de la forêt boréale canadienne, soit 164,000 km² de forêt, de tourbières et de marécage (Tarnocai et Lacelle, 1996). Cette espèce représente plus de 50% de la province albertaine (Alberta Forest Conservation Strategy steering committee, 1997).

Le pin gris est considéré en tant que deuxième espèce la plus plantée au Québec (MRNF, 2007) où la forêt boréale québécoise couvre 18,92% de la superficie totale des forêts canadiennes et 761,100 km² de la superficie totale de la province ce qui représente presque la moitié de la aire québécoise (Ministère des ressources naturelles du Québec, 2012).

Dang et Cheng (2004) pensent que le pin gris est une espèce pionnière qui peut vivre jusqu'à 230 ans (Zhang et Koubaa, 2009). Étant donné que c'est une essence héliophile, les pinèdes grises deviennent plus denses ce qui induit une concurrence entre les arbres et par conséquent un important taux de mortalité (Day et Nanang, 1996). Visiblement, ce conifère croît plus vite que les autres résineux et peut atteindre une hauteur moyenne de 2.1 m en dix ans de

croissance (SPBAT, 2000). À maturité, le pin gris atteint une hauteur de 20 mètres et un diamètre à hauteur de poitrine de 20 à 25 cm (SPBAT, 2000).

Les pinèdes grises poussent généralement sur des sites peu fertiles tels que les terrains sableux, les sols peu profonds et même les pergélisols (Farrar, 1995). Béland, Bergeron et Zarnovican (2003) pensent que même si le pin gris peut croître sur des sols à texture grossière, il peut atteindre de bien meilleures performances sur des sols à texture fine (Béland et al., 2003).

Selon Law et Valade (1994), le pin gris représente plus de 20% du marché résineux au Canada et son bois est utilisé par les industries du bois d'œuvre et des pâtes à papiers (Duchesne, 2006). D'après Farrar (1995), ce conifère représente l'espèce de pâte à papier la plus importante au Canada. En effet, le bois de ce conifère est réputé non seulement dans le bois d'œuvre mais aussi pour les produits composites ainsi que le bois de deuxième transformation (Zhang et Koubaa, 2009).

Les épinettes noires (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.), quant à elles, forment les plus vieilles forêts dans les zones boréales du Canada et se trouvent dans l'Est du continent, soit au Québec, en Ontario ainsi qu'à Terre-Neuve. L'épinette noire est surtout répandue au Québec (Saucier et al., 1998) où elle couvre 28% de sa superficie (Gagnon et Morin, 2001). À l'Ouest de la forêt boréale canadienne, l'épinette noire occupe à la fois les hautes terres et les plaines et puisque la forêt boréale de la région naturelle occupe la majeure partie du Nord de l'Alberta, l'épinette noire est parmi les conifères les plus dominants dans cette région (Alberta Natural Regions Committee, 2006).

Lorsque l'épinette noire pousse sur des sols mal drainés, elle atteint 20 mètres de hauteur et 30 cm de diamètre à hauteur de poitrine (DHP). En revanche, cette espèce peut atteindre les 30 mètres de hauteur et 60 cm de DHP dans le cas où elle pousse dans des stations sèches et bien drainées (Farrar, 1995).

Dans la partie sud la forêt boréale canadienne, l'épinette noire se trouve principalement sur les sols organiques humides, tandis qu'au nord son abondance sur les hautes terres augmente (Flanagan et Van Cleve, 1977).

Généralement, la croissance de l'épinette noire est favorisée au sein des peuplements les plus purs et sur des sols organiques, ce qui n'est pas le cas au sein des peuplements mélangés où la croissance de l'épinette noire requiert des sols minéraux (Flanagan et Van Cleve, 1977).

À l'Ouest du Canada, plus précisément en Alberta, l'épinette noire se trouve rarement sur des sites calcaires et n'est pas abondante dans les tourbières boisées. La forêt boréale de la région naturelle occupe la majeure partie du nord de l'Alberta et l'épinette noire est parmi les conifères les plus dominants dans cette forêt. Cette essence se trouve également sur les pentes et les sommets des montagnes du nord (Alberta Natural Regions Committee, 2006). Au nord du Québec, en zones sèches, les peuplements d'épinettes noires semblent être soumis à une baisse de potassium, de calcium et d'azote (Welke et Fyles, 2005).

2.2 Sites d'étude

2.2.1 Placettes-échantillons permanentes (PEP): Description et distribution

Afin de gérer efficacement les ressources forestières, il faut une meilleure compréhension de la dynamique des peuplements, c'est à dire de la façon dont les arbres poussent et changent avec le temps. Le meilleur procédé de détermination de la croissance et du rendement est l'utilisation des placettes d'échantillonnage permanentes (PEP) (Pothier et Savard, 1998). Ainsi, la croissance d'un peuplement peut être estimée directement par la prise de mesures des mêmes arbres à intervalles réguliers. Les placettes d'échantillonnage permanentes permettent non seulement d'évaluer la dynamique des peuplements telle que la succession, la régénération, la croissance interne et de la mortalité mais également de fournir une base de données qui peut être utilisée pour élaborer des courbes de rendement (Environment and Sustainable Resource Development, 2005).

Il existe deux types de placettes : les placettes-échantillons temporaires (PET) et les placettes-échantillons permanentes (PEP). Généralement, les PET servent à calculer les paramètres des équations qui déterminent le volume marchand des arbres tandis que les PEP servent à la description de l'évolution de la densité des peuplements et à l'évaluation de la performance du modèle à développer (Pothier et Savard, 1998). Les placettes utilisées pour cette recherche sont donc les PEP.

La base des données dendrométriques de plusieurs espèces forestières pour la période allant de 1990 à 2005 a été fournie par le ministère de l'environnement et du développement des ressources durables en Alberta (Environment and Sustainable Resource Development, 2005) et le ministère des ressources naturelles et de la faune du Québec (Duchesne et Ouimet, 2008). Cette base de données contenait des informations considérables sur des peuplements forestiers qui ne font pas l'objet de cette présente recherche. Il a été donc nécessaire de faire le tri par le biais d'une programmation algorithmique avec Visual Basic pour ne retenir que les PEP des pinèdes grises et les épinettes noires. Par la suite, tous les arbres endommagés et malades ont été éliminés afin d'avoir des résultats concluants lors du développement des modèles hauteur-diamètre des deux peuplements à l'échelle provinciale et écorégionale de l'Alberta et du Québec.

Dans la présente recherche, le nombre de placettes-échantillons permanentes (PEP) des pinèdes grises et des épinettes noires en Alberta (figure 2.1) est beaucoup moins important que celui du Québec (figure 2.2). Ceci s'explique, d'une part, par la répartition de ces espèces forestières qui s'étendent sur une grande superficie de la forêt québécoise (Pothier et Savard, 1998) et d'autre part, par la stratégie d'emplacement des PEP de l'Alberta qui est différente de celle employée par le Québec. En effet, il existe seulement 3,000 PEP, pour toutes les espèces forestières y compris les épinettes noires et les pinèdes grises, établies depuis 1960 en Alberta (Environment and Sustainable Resource Development, 2005) comparé au 12,300 PEP installées au Québec et ce depuis 1970 (Ministère des ressources naturelles du Québec, 2009). De plus, la superficie d'une PEP en Alberta est de 1000 m² (Environment and Sustainable Resource Development, 2005) tandis qu'au Québec la PEP a une superficie de 400 m² (Ministère des ressources naturelles du Québec, 2009).

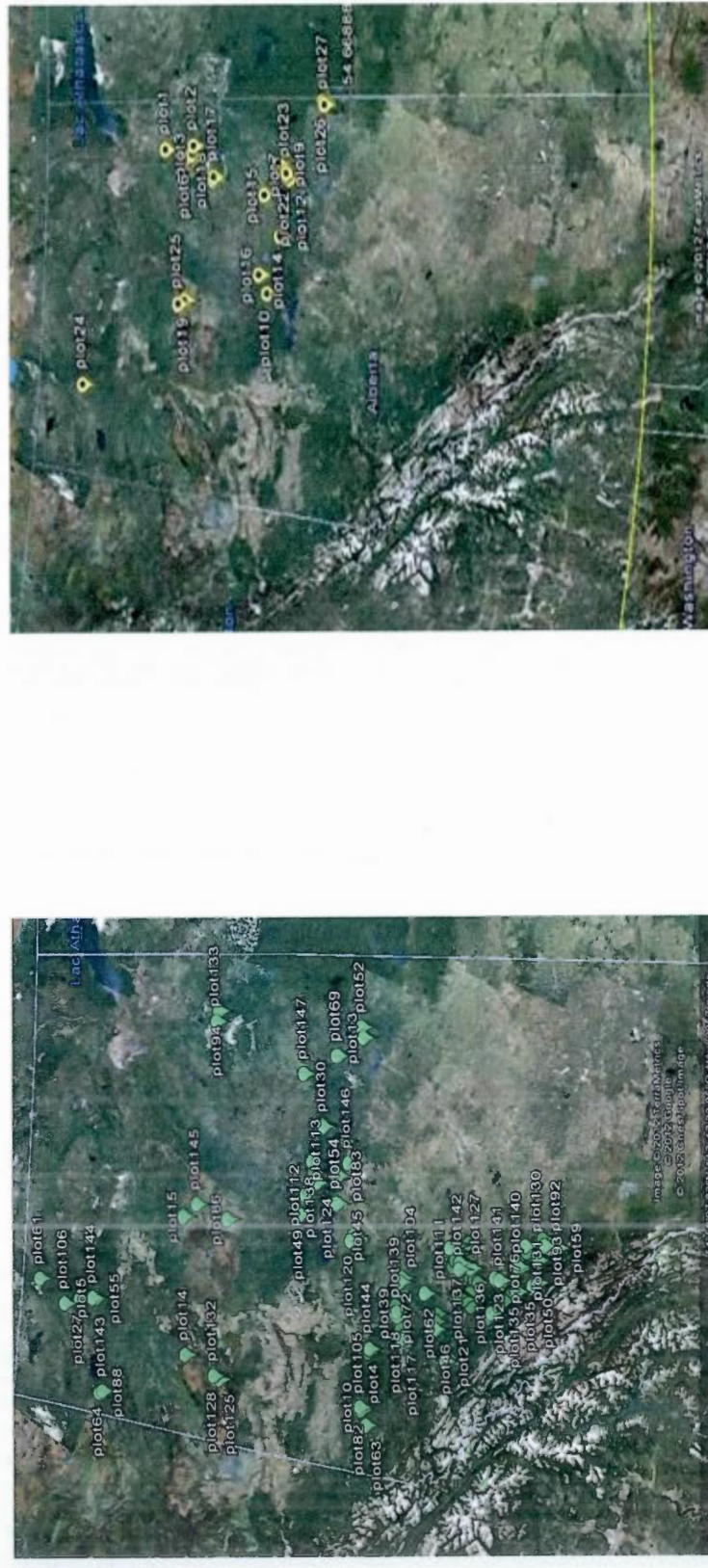


Figure 2.1 Répartition des placettes d'échantillonnage de l'épinette noire (a) et du pin gris (b) en Alberta (Google Earth, 2012)

2.2.2 Écorégionalisation des PEP de l'Alberta et du Québec

Rankin, Austin et Rice (2012) définissent les écorégions en tant qu'unités adjacentes dont les limites sont déterminées par des caractéristiques biotiques et abiotiques. D'après ces scientifiques, les limites peuvent être soit bien visibles telle que la limite entre les biomes alpins et subalpins, soit floues telle que la limite entre la forêt boréale et les forêts-parcs. Wiken (1986), quant à lui, a décrit l'écorégionalisation à l'échelle nationale d'une manière générale. En 1995, le groupe de travail sur la stratification écologique a mené une étude plus pointue de l'écorégionalisation intitulée « *Cadre écologique national pour le Canada* » (Marshall et Schut, 1999). Cette étude définit les écozones, les écorégions, les écodistricts et les pédo-paysages du Canada selon plusieurs facteurs notamment la topographie, l'hydrologie et le climat. Le *Cadre écologique national pour le Canada* a été adopté par plusieurs chercheurs scientifiques et une mise à jour de cette étude est prévue (Rankin, Austin et Rice, 2012). Par ailleurs, les régions naturelles sont les unités écologiques les plus cartographiées dans le système de classification écorégional de l'Alberta. Ils sont définis géographiquement sur la base de modèles de paysage, notamment la végétation, les sols et les caractéristiques physiographiques. L'influence du climat, de la topographie et de la géologie est reflétée par la distribution de ces facteurs (Achuff, 1994 ; Marshall, Smith et Selby, 1996).

À n'importe quel endroit dans le paysage, l'influence relative de chaque facteur est déterminée par l'interaction du climat, de la topographie ainsi que les éléments biotiques agissant tous dans le temps. Ces facteurs peuvent être définis et représentés comme des unités abstraites de cartographie écologique et peuvent être décrites à différentes échelles. Les termes biome ou zone de végétation sont employés à l'échelle mondiale tandis qu'à l'échelle nationale canadienne, les termes employés sont souvent écozones, écodistricts et écorégions (Jenny, 1941 ; Major, 1951).

Les principales caractéristiques des écorégions albertaines et québécoises ainsi que les codes utilisés dans cette étude sont résumées dans les tableaux A.1 et A.2 de l'appendice A (Alberta Natural Regions Committee, 2006 ; Marshall et Schut, 1999).

Selon les coordonnées géographiques fournies par le ministère d'environnement et de développement des ressources durables en Alberta et le ministère des ressources naturelles du Québec, les placettes d'échantillonnage des épinettes noires et des pinèdes grises ont été assignées aux différentes écorégions albertaines et québécoises (tableaux 2.1 et 2.2).

Le nombre total de placettes utilisées ainsi que le nombre d'observations pour chaque espèce sont indiqués dans les tableaux 2.1 et 2.2. Il semble que le nombre de placettes en Alberta est beaucoup moins élevé que celui du Québec pour les deux espèces. En effet, les stratégies d'emplacements des PEP ainsi que leurs dimensions en Alberta et au Québec sont différentes tel expliqué précédemment.

Par ailleurs, les 4964 placettes québécoises totalisent 198.56 ha dans lesquelles 33323 arbres ont été échantillonnés, ce qui donne une densité d'échantillonnage de 167.8 tiges d'épinettes noires/ha au Québec. Concernant l'Alberta, la densité d'échantillonnage est de 817.5 tiges d'épinettes noires/ha (tableaux 2.1 et 2.2).

Tableau 2.1 Répartition des PEP de l'épinette noire et du pin gris au Québec

| Écorégion | Nombre de placettes | | Nombre d'observations | |
|-----------|---------------------|----------|-----------------------|----------|
| | Épinette noire | Pin gris | Épinette noire | Pin gris |
| (E5,Qc) | 206 | 37 | 2255 | 273 |
| (E6,Qc) | 1157 | 466 | 9566 | 2646 |
| (E7,Qc) | 1811 | 155 | 11804 | 867 |
| (E8,Qc) | 1607 | 434 | 8933 | 2294 |
| (E9,Qc) | 76 | | 232 | |
| (E10,Qc) | 107 | | 533 | |
| Total | 4964 | 1092 | 33323 | 6080 |

Concernant les pins gris, la densité d'échantillonnage est de 55.67 tiges de pin gris/ha au Québec, contrairement à la forte densité d'échantillonnage retrouvée en Alberta et qui représente 1042.22 tige de pin gris/ha (tableaux 2.1 et 2.2).

Tableau 2.2 Répartition des PEP de l'épinette noire et du pin gris en Alberta

| Écorégion | Nombre de placettes | | Nombre d'observations | |
|-----------|---------------------|----------|-----------------------|----------|
| | Épinette noire | Pin gris | Épinette noire | Pin gris |
| (E2,AB) | 9 | 6 | 710 | 1092 |
| (E3,AB) | 66 | 18 | 6222 | 1495 |
| (E4,AB) | 11 | 3 | 649 | 227 |
| (E5,AB) | 61 | | 4436 | |
| Total | 147 | 27 | 12017 | 2814 |

2.3 Traitement des données

2.3.1 Hauteur et diamètre à hauteur de poitrine (DHP)

En ce qui concerne les paramètres de croissance, nous nous intéresserons à la relation entre la hauteur et DHP qui constitue l'un des éléments les plus importants de la structure de la forêt boréale. La hauteur totale de l'arbre et le DHP (mesuré à 1.3 mètre du sol) à l'extérieur de l'écorce, sont deux mesures essentielles de l'inventaire forestier ; ils peuvent être utilisés afin d'estimer le volume du bois, l'indice de site, le rendement, la succession et les modèles de bilan de carbone ainsi que d'autres variables importantes pour la croissance des forêts (Peng *et al.*, 2004).

Afin de collecter les données nécessaires à la réalisation de ce projet il est important de s'intéresser aux dispositifs de mesure. Ainsi, chaque arbre de la PEP est équipé lors de sa première mesure d'un dendromètre permanent (ou ruban dendrométrique), muni d'un ressort et d'un vernier. Cet équipement permet une mesure de la circonférence du tronc avec une précision théorique de 0.02 mm. Cette mesure est bien plus précise que celle que l'on peut attendre de la plupart des dispositifs permanents installés dont le suivi de la croissance en circonférence est basé sur des remesures manuelles au mètre à ruban à un niveau de référence. Le dendromètre est positionné "à hauteur de poitrine" autrement dit, il est placé à 1.30 m au dessus du sol. Généralement, la hauteur d'un arbre est définie par la longueur entre le point de la germination et la pointe de la flèche terminale. Les hauteurs sont mesurées à

Tableau 2.4 Données dendrométriques sur les épinettes noires à l'échelle écorégionale et provinciale de l'Alberta et du Québec

| Écorégion | N | DHP (cm) | | | | Hauteur (m) | | | |
|--|-------|----------|------------|------|-------|-------------|------------|------|-------|
| | | Moyenne | Écart-type | Min. | Max. | Moyenne | Écart-type | Min. | Max. |
| Alberta | | | | | | | | | |
| E2(EPN,AB) | 710 | 8.80 | 7.26 | 0.10 | 37.40 | 7.79 | 5.81 | 1.40 | 29.10 |
| E3(EPN,AB) | 6222 | 11.98 | 4.83 | 0.40 | 31.70 | 11.65 | 4.25 | 1.30 | 24.70 |
| E4(EPN,AB) | 649 | 14.31 | 5.23 | 1.30 | 33.20 | 12.31 | 4.20 | 1.80 | 24.50 |
| E5(EPN,AB) | 4436 | 12.73 | 5.30 | 0.20 | 44.30 | 12.29 | 4.18 | 1.40 | 32.00 |
| Province | 12017 | 12.18 | 5.29 | 0.10 | 44.30 | 11.69 | 4.45 | 1.30 | 32.00 |
| Québec | | | | | | | | | |
| E5(EPN,QC) | 2255 | 12.78 | 3.49 | 1.00 | 31.00 | 10.63 | 2.98 | 1.50 | 24.80 |
| E6(EPN,QC) | 9566 | 14.08 | 4.32 | 1.00 | 34.30 | 11.44 | 3.39 | 1.60 | 41.10 |
| E7(EPN,QC) | 11804 | 14.83 | 4.76 | 0.10 | 37.90 | 11.16 | 3.58 | 0.60 | 26.30 |
| E8(EPN,QC) | 8933 | 15.43 | 5.46 | 0.10 | 47.80 | 12.70 | 4.07 | 0.60 | 29.90 |
| E9(EPN,QC) | 232 | 17.20 | 6.32 | 2.70 | 42.70 | 12.81 | 3.84 | 2.60 | 21.70 |
| E10(EPN,QC) | 533 | 13.31 | 4.90 | 1.70 | 27.30 | 9.93 | 3.87 | 1.60 | 20.70 |
| Province | 33323 | 14.63 | 4.84 | 0.10 | 47.80 | 11.61 | 3.71 | 0.60 | 41.10 |
| N : Nombre d'observations, Min. : minimum, Max. : maximum. | | | | | | | | | |

Le tableau 2.3 révèle que la plus petite valeur du DHP moyen du pin gris se retrouve au niveau de l'écorégion E2(PG,AB) et de l'écorégion E6(PG,QC) tandis que la plus grande valeur est observée au niveau de E3(PG,AB) et de E8(PG,QC). Pour ce qui est de la hauteur moyenne du pin gris, la plus grande valeur est observée au niveau de E4(PG,AB) et E8(PG,QC) alors que la plus petite valeur se trouve au niveau de E2(PG,AB) et E5(PG,QC).

En examinant les données dendrométriques du tableau 2.4, il s'avère que la plus petite valeur du diamètre moyen des épinettes noires se retrouve au niveau de E2(EPN,AB) et de l'écorégion E5(EPN,QC) tandis que la plus grande valeur est observée au niveau de l'écorégion E4(EPN,AB) et de l'écorégion E9(EPN,QC). Pour ce qui est de la hauteur moyenne de l'épinette noire, la plus grande valeur est observée au niveau de l'écorégion

E4(EPN,AB) et de l'écorégion E9(EPN,QC) alors que la plus petite valeur se trouve au niveau de l'écorégion E2(EPN,AB) et de l'écorégion E10(EPN,QC).

2.3.2 Développement des modèles hauteur-diamètre

Il semblerait qu'il n'existe pas de variables universelles dans le développement des modèles, puisque ceux-ci dépendent fortement de l'intuition de l'enquêteur, de la spécification du modèle et de la productivité du site étudié (Nanos *et al.*, 2004).

Afin de développer le modèle hauteur-diamètre pour le pin gris et l'épinette noire à travers les écorégions albertaines et québécoises, la fonction de croissance Chapman-Richards (Chapman, 1961 ; Richards, 1959) est l'une des meilleures fonctions non linéaires pour décrire la relation entre la hauteur et le diamètre de différentes espèces, tel que l'indique la littérature forestière. Cette fonction est utilisée pour modéliser la relation entre la hauteur et le diamètre du pin gris et de l'épinette noire à travers les différents sites d'échantillonnage de l'Alberta et du Québec avec des coefficients biologiquement interprétables. La fonction de Chapman-Richards est représentée par l'équation suivante (Peng *et al.*, 2001 ; Peng *et al.*, 2004) :

$$H = 1.3 + a (1 - e^{-b \cdot DHP})^c \quad (2.1)$$

Avec:

H: Hauteur totale prédite en mètre

DHP: diamètre à hauteur de poitrine en centimètre,

a : maximum de la hauteur

b : incrément de DHP et

c : la relation entre la hauteur et le DHP

La fonction Chapman-Richards a donc été appliquée à toutes les données à savoir N=2814 pour le pin gris en Alberta et N=6080 au Québec ainsi que pour l'épinette noire avec N=12017 en Alberta et N=33323 au Québec. Cette fonction a été également appliquée aux données des écorégions relatives aux deux provinces. Ainsi, pour le pin gris, quatre modèles ont été développés en Alberta et cinq modèles au Québec. Concernant, l'épinette noire, cinq

modèles ont été développés en Alberta et sept au Québec. Au total, vingt et un modèles ont été développés en se fondant sur la fonction non linéaire de Chapman-Richards. Les paramètres du modèle et les analyses statistiques ont été estimés en utilisant la procédure NLIN du système d'analyses statistiques SAS 9.2 (SAS Institute, 2009); la méthode algorithmique de Levenberg-Marquardt (Levenberg, 1944 ; Marquardt, 1963) a été adoptée pour l'estimation des paramètres de la fonction de Chapman-Richard (Chapman, 1961 ; Richards, 1959). En effet, les scientifiques Fang et Bailey (1998), Peng (1999) et (Peng *et al.*, 2001) considèrent que cette méthode est la plus efficace lorsque les variables (la hauteur prédite et le DHP) de la fonction sont fortement corrélées. Afin de s'assurer que les résultats issus de l'analyse algorithmique soient corrects, plusieurs valeurs initiales des paramètres du modèle ont été utilisées pour les ajustements. Il est à noter que l'étude de l'homogénéité de la variance a été validée. Ainsi, la méthode des moindres carrée non-linéaire a été adoptée pour l'estimation des paramètres a, b et c de la fonction de Chapman-Richards. Chaque modèle a été évalué en utilisant la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM) ainsi que le coefficient de détermination (R^2) (Peng, 1999 ; Peng *et al.*, 2001).

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne est calculée comme suit:

$$REQM = \sqrt{\sum_{i=1}^n (H_i - \hat{H})^2 / n} \quad (2.2)$$

Le coefficient de détermination se calcule de la façon suivante :

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \hat{H}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H}_1)^2} \right] \quad (2.3)$$

Avec:

n : nombre d'observations ;

\hat{H}_i : la hauteur prédite en mètre pour le $i^{\text{ème}}$ arbre ;

H_i : la hauteur réelle totale en mètres pour le $i^{\text{ème}}$ arbre et

\bar{H}_1 : la hauteur réelle moyenne en mètre

2.3.3 Évaluation de la performance des modèles hauteur-diamètre

Il existe deux méthodes d'évaluation de la performance du modèle selon Pothier et Savard (1998), la première consiste à conserver une partie des données qui n'a pas été utilisée pour le calcul des paramètres du modèle à développer. Or, il s'avère qu'il n'est pas toujours possible de le faire. La deuxième méthode repose sur l'utilisation des données ayant servi au développement du modèle pour prédire l'état des placettes qui n'ont pas été utilisées (Pothier et Savard, 1998).

Ainsi, la deuxième méthode a été adoptée dans ce présent travail. Celle-ci repose sur trois étapes : La première étape est basée sur le calcul de l'erreur moyenne de prédiction du modèle (\bar{e}), il est, par conséquent, possible de prédire l'état d'une placette grâce aux valeurs des paramètres du modèle des $n-1$ des autres placettes (Pothier et Savard, 1998). La deuxième étape consiste à calculer l'écart-type de l'erreur de la prédiction des hauteurs des arbres (S_e). En effet, Cette partie de la recherche nous permettra d'évaluer les conséquences et les préjugés du modèle Chapman-Richards en illustrant la moyenne des écart-types de prévision de la hauteur pour les intervalles de 5 cm de DHP pour les pinèdes grises et les épinettes noires à l'échelle provinciale de l'Alberta et du Québec. La troisième étape repose sur le calcul du biais de prédiction des hauteurs des arbres (biais (%)) (Peng, 1999 ; Peng *et al.*, 2004). Il est à noter que le calcul de l'erreur moyenne associée à la prédiction de la hauteur des peuplements (\bar{e}) permet de prédire l'état de chaque placette individuellement, or, l'utilisation des modèles de développement ne vise pas seulement à prédire l'état d'un peuplement en particulier mais plutôt celui d'un groupe de peuplement. C'est pour cette raison que le biais de prédiction de la hauteur des arbres étudiés a été calculé puisque ce dernier correspond à l'erreur associée à la prédiction de la hauteur des arbres de toutes les placettes retenues pour l'étude (Pothier et Savard, 1998).

Les équations d'évaluation des modèles développés sont présentées tel que suit (Peng, 1999 ; Peng *et al.*, 2004) :

$$\bar{e} = [\sum_{i=1}^m (H_i - \hat{H}_i)]/m \quad (2.4)$$

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (e_i - \bar{e})^2}{m}} \quad (2.5)$$

$$\text{Biais (\%)} = \frac{\bar{e}}{\bar{H}} \times 100 \quad (2.6)$$

Avec:

e_i : la différence observée entre la hauteur réelle H_i et la hauteur prédite \hat{H}_i ,

$i = 1, 2, \dots, m$ et

m : le nombre d'observations relevé pour chaque écorégion

Un test t communément appelé test de student a été appliqué dans le but de tester l'hypothèse nulle qui suggère que l'erreur prédite $\bar{e} = 0$ (Peng *et al.*, 2004).

$$t = \frac{\bar{e}}{s_e / \sqrt{m}} \quad (2.7)$$

CHAPITRE III

RESULTATS

3.1 Développement des modèles hauteur-diamètre

Cette partie de l'étude s'intéresse au développement des modèles hauteur-diamètre à l'échelle provinciale et écorégionale de l'Alberta et du Québec. L'équation qui s'est le mieux ajustée aux données observées est l'équation non linéaire de Chapman-Richards (équation 2.1) qui a permis un meilleur ajustement pour l'ensemble des hauteurs prédites dans les deux provinces. Le choix de la fonction de Chapman-Richard a été fait dans le but de comparer les résultats des hauteurs prédites pour le pin gris et l'épinette noire à travers les écorégions et les deux provinces.

De ce fait, les critères de développement des modèles ont été pris en compte tel que suit:

- Les valeurs des paramètres a , b et c du modèles Chapman-Richards pour le pin gris et l'épinette noire à travers les provinces et les écorégions de l'Alberta et du Québec ont été calculées grâce à la méthode algorithmique de Levenberg-Marquardt,
- La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM) des modèles est calculée en se basant sur l'équation (2.2) et
- La valeur du coefficient de détermination R^2 calculée suivant l'équation (2.3)

Le nombre d'observations par province et par écorégion, les paramètres des modèles (a, b et c), la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM) et le coefficient de détermination (R^2) des pinèdes grises et des épinettes noires pour l'Alberta et le Québec ainsi que leurs écorégions respectives figurent dans les tableaux 3.1 et 3.2.

Tableau 3.1 Estimation des coefficients de la fonction Chapman-Richards pour le pin gris à l'échelle écorégionale et provinciale de l'Alberta et du Québec

| Échelle | N | \bar{H} | \hat{H} | a | b | c | REQM | %REQM | R^2 |
|--|------|-----------|-----------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|
| ALBERTA | | | | | | | | | |
| E2(PG,AB) | 1092 | 14.2972 | 14.8579 | 20.0225 | 0.0818 | 1.1262 | 1.8268 | 12.2951 | 0.9558 |
| E3(PG,AB) | 1495 | 16.4630 | 16.3329 | 25.1678 | 0.0521 | 0.9322 | 1.7778 | 10.8847 | 0.9561 |
| E4(PG,AB) | 227 | 17.2837 | 15.5287 | 17.7745 | 0.2170 | 2.5086 | 1.4176 | 9.1289 | 0.8943 |
| Province | 2814 | 16.0146 | 15.5731 | 25.6943 | 0.0475 | 0.8924 | 1.8868 | 12.1157 | 0.9593 |
| QUÉBEC | | | | | | | | | |
| E5(PG,QC) | 273 | 10.6685 | 11.2339 | 14.6891 | 0.1586 | 2.9009 | 1.7187 | 15.2992 | 0.9262 |
| E6(PG,QC) | 2646 | 11.2018 | 11.6743 | 19.6667 | 0.0899 | 1.8519 | 2.2808 | 19.5369 | 0.9553 |
| E7(PG,QC) | 867 | 11.4469 | 11.6023 | 18.1290 | 0.1123 | 2.1315 | 2.5990 | 22.4007 | 0.9318 |
| E8(PG,QC) | 2294 | 14.6245 | 13.9307 | 21.2807 | 0.0990 | 2.0262 | 2.7421 | 19.6838 | 0.9011 |
| Province | 6080 | 11.9854 | 12.1103 | 21.6417 | 0.0864 | 1.8880 | 2.5651 | 21.1811 | 0.9425 |
| N : Nombre d'observation ; \bar{H} : moyenne des hauteurs réelles en mètre, \hat{H} : moyenne des hauteurs prédites en mètre a, b, c : coefficients ; REQM : racine carrée de l'erreur quadratique moyenne en mètre ; R^2 : coefficient de détermination | | | | | | | | | |

Avec :

$$\%REQM = 100 * 1 / \hat{H} * REQM \quad (\text{Kankare et al., 2013})$$

Tableau 3.2 Estimation des coefficients de la fonction Chapman-Richards pour l'épinette noire à l'échelle écorégionale et provinciale de l'Alberta et du Québec

| Échelle | N | \bar{H} | \hat{H} | a | b | c | REQM | %REQM | R ² |
|----------------|-------|-----------|-----------|---------|--------|--------|--------|---------|----------------|
| ALBERTA | | | | | | | | | |
| E2(EPN,AB) | 710 | 7.7942 | 8.6237 | 48.0859 | 0.0257 | 1.2525 | 1.5697 | 18.2021 | 0.9784 |
| E3(EPN,AB) | 6222 | 11.6501 | 11.6424 | 18.7023 | 0.1245 | 2.0288 | 2.1623 | 18.5726 | 0.9448 |
| E4(EPN,AB) | 649 | 12.3148 | 13.1893 | 30.2296 | 0.0376 | 1.1063 | 2.3482 | 17.8038 | 0.9860 |
| E5(EPN,AB) | 4436 | 12.2932 | 12.1654 | 25.9919 | 0.0619 | 1.3700 | 2.0400 | 16.7688 | 0.9671 |
| Province | 12017 | 11.0130 | 11.4052 | 26.8423 | 0.0552 | 1.2697 | 1.9678 | 17.2535 | 0.9762 |
| QUÉBEC | | | | | | | | | |
| E5(EPN,QC) | 2255 | 10.6370 | 10.4380 | 26.1824 | 0.0603 | 1.6393 | 1.4337 | 13.7353 | 0.9865 |
| E6(EPN,QC) | 9566 | 11.4417 | 11.2866 | 22.8947 | 0.0653 | 1.5539 | 1.8563 | 16.4469 | 0.9839 |
| E7(EPN,QC) | 11804 | 11.1632 | 11.7659 | 25.9943 | 0.0491 | 1.4425 | 1.8952 | 16.1075 | 0.9812 |
| E8(EPN,QC) | 8933 | 12.7008 | 12.0783 | 21.1664 | 0.0832 | 1.7732 | 2.0127 | 16.6637 | 0.9757 |
| E9(EPN,QC) | 232 | 12.8116 | 13.0752 | 17.3642 | 0.1129 | 2.2303 | 2.1583 | 16.5068 | 0.9597 |
| E10(EPN,QC) | 533 | 9.9358 | 10.7082 | 23.3488 | 0.0609 | 1.6578 | 1.9570 | 18.2757 | 0.9800 |
| Province | 33323 | 11.4483 | 9.8920 | 23.0198 | 0.0650 | 1.5864 | 1.9547 | 19.7604 | 0.9801 |

N : Nombre d'observations ; \bar{H} : moyenne des hauteurs réelles en mètre, \hat{H} : moyenne des hauteurs prédites en mètre a, b, c : coefficients ; REQM : racine carrée de l'erreur quadratique moyenne; R² : coefficient de

Les coefficients asymptotiques (a), calculés pour les deux provinces et leurs écorégions sont généralement variables mais des valeurs semblables du coefficient (a) du modèle développé pour le pin gris sont retrouvées au niveau de l'écorégion E3(PG,AB) et la province de l'Alberta. Les coefficients sont également presque semblables pour la province du Québec et l'écorégion E8(PG,QC) (tableau 3.1).

Pour ce qui des coefficients asymptotiques (a) du modèle développé pour l'épinette noire, des valeurs semblables sont retrouvées pour l'écorégion E5(EPN,AB) et la province de l'Alberta, ainsi que l'écorégion E10(EPN,QC) et la province du Québec (tableau 3.2).

Les valeurs de la REQM, pour le pin gris, en Alberta, sont comprises entre 1.41 et 1.89 avec la plus petite valeur observée pour l'écorégion E4(PG,AB). Au Québec, ces valeurs varient

de 1.71 à 2.75 avec la plus petite valeur de la REQ_M observée pour E5(PG,QC) (tableau 3.1). Concernant l'épinette noire, en Alberta, les valeurs de la REQ_M fluctuent de 1.56 à 2.35. La plus petite valeur de la REQ_M est prélevée dans l'écorégion E2(EPN,AB). Au Québec, la REQ_M est comprise entre 1.56 et 2.16 avec la plus petite valeur observée au niveau de l'écorégion E5(EPN,QC) (tableau 3.2).

Les valeurs du coefficient de détermination R^2 , pour les deux modèles provinciaux et leurs écorégions respectives pour le pin gris, sont supérieurs à 0.92 sauf pour l'écorégion E4(PG,AB) de l'Alberta et l'écorégion E8(PG,QC) du Québec (tableau 3.1). La plus grande valeur de R^2 est relevée pour l'Alberta au niveau du modèle provincial. La plus petite valeur du R^2 est observée au niveau de l'écorégion E4(PG,AB) (tableau 3.1.). Pour ce qui est du Québec, la plus grande valeur du R^2 est au niveau de l'écorégion E6(PG,QC) tandis que la plus petite valeur de R^2 est observée au niveau de l'écorégion E8(PG,QC) (tableau 3.1).

Concernant l'épinette noire, les valeurs des coefficients de régression R^2 pour les deux modèles provinciaux et leurs écorégions respectives est supérieure à 0.96 sauf pour l'écorégion E3(EPN,AB) et l'écorégion E9(EPN,QC) (tableau 3.2). La plus grande valeur de R^2 pour l'Alberta est retrouvée au niveau de E4(EPN,AB), la plus petite valeur est associée à l'écorégion E3(EPN,AB) (tableau 3.2). Au Québec, les valeurs R^2 sont semblables (0.98) sauf pour l'écorégion E8(EPN,QC) et pour l'écorégion E9(EPN,QC) dont les valeurs du R^2 correspondent respectivement à 0.97 et à 0.95 (tableau 3.2).

3.2 Évaluation des modèles provinciaux et écorégionaux

Cette section du présent travail, s'intéresse à l'évaluation des modèles hauteur-diamètre développés pour les pinèdes grises et les épinettes noires pour l'Alberta et le Québec ainsi que leurs écorégions respectives. Afin de bien comprendre les aspects relatifs à cette évaluation, il est nécessaire de prendre en considération les critères suivants :

1. La moyenne de l'erreur associée à la prédiction des hauteurs des arbres (\bar{e}) (équation 2.4) ;
2. L'écart-type de l'erreur de la prédiction des hauteurs des arbres (S_e) (équation 2.5) ;

3. Le biais de prédiction des erreurs associées à la hauteur des arbres (équation 2.6) ;
4. Le test t pour tester l'hypothèse nulle qui suggère que l'erreur moyenne de prédiction $\bar{e} = 0$ (équation 2.7).

Ainsi, les tableaux 3.3. et 3.4 résument les résultats statistiques des critères énumérés ci-dessus, et ce, lorsque le modèle provincial de l'Alberta et celui du Québec sont appliqués à leurs écorégions respectives.

Tableau 3.3 Prédictions des hauteurs lorsque les modèles provinciaux des pinèdes grises sont appliqués à leurs écorégions respectives

| Écorégion | N | \bar{H} | \hat{H} | \bar{e} | S_e | Biais (%) | t | valeur de p |
|------------------|------|-----------|-----------|-----------|--------|-----------|----------|-------------|
| ALBERTA | | | | | | | | |
| E2(PG,AB) | 1092 | 14.2972 | 14.8579 | -0.5606 | 1.9185 | -3.9215 | -9.6571 | <0.0001 |
| E3(PG,AB) | 1425 | 16.4630 | 16.3329 | 0.1300 | 1.7806 | 0.7902 | 2.8248 | 0.0047 |
| E4(PG,AB) | 227 | 17.2837 | 15.5287 | 1.7549 | 2.3369 | 10.1539 | 11.314 | <0.0001 |
| QUÉBEC | | | | | | | | |
| E5(PG,QC) | 273 | 10.6685 | 11.2339 | -0.5654 | 1.8933 | -5.2995 | -4.9340 | <0.0001 |
| E6(PG,QC) | 2646 | 11.2018 | 11.6743 | -0.4725 | 2.3490 | -4.2180 | -10.3467 | <0.0001 |
| E7(PG,QC) | 867 | 11.4469 | 11.6023 | -0.1554 | 2.6283 | -1.3572 | -1.7405 | 0.0022 |
| E8(PG,QC) | 2294 | 14.6245 | 13.9307 | 0.6939 | 2.8317 | 4.7447 | 11.7367 | 0.0247 |

N : Nombre d'observation, \bar{H} : moyenne des hauteurs réelles en mètre, \hat{H} : moyenne des hauteurs prédites en mètre, \bar{e} : moyenne de l'erreur prédite (m), S_e : écart-type moyen de l'erreur prédite

Tableau 3.8 Prédiction des hauteurs lorsque les modèles écorégionaux québécois des épinettes noires sont appliqués à chaque écorégion

| Écorégion | N | \bar{H} | \hat{H} | $\bar{\epsilon}$ | S_{ϵ} | Biais (%) | t | valeur de p |
|---------------------------------|-------|-----------|-----------|------------------|----------------|-----------|----------|-------------|
| E5(EPN,QC) appliqué sur | | | | | | | | |
| E5(EPN,QC) | 2255 | 10.6370 | 10.6325 | 0.0046 | 1.4325 | 0.0430 | 0.1516 | 0.3463 |
| E6(EPN,QC) | 9566 | 11.4417 | 11.5755 | -0.1337 | 1.8877 | -1.1688 | -6.9286 | <0.0001 |
| E7(EPN,QC) | 11804 | 11.1632 | 12.1136 | -0.9504 | 2.1545 | -8.5132 | -47.9248 | <0.0001 |
| E8(EPN,QC) | 8933 | 12.7008 | 12.4763 | 0.2245 | 2.0669 | 1.7675 | 10.2653 | <0.0001 |
| E9(EPN,QC) | 232 | 12.8116 | 13.5978 | -0.7862 | 2.5340 | -6.1366 | -4.7257 | <0.0001 |
| E10(EPN,QC) | 533 | 9.9358 | 10.9689 | -1.0331 | 2.2461 | -10.3974 | -10.6187 | <0.0001 |
| E6(EPN,QC) appliqué sur | | | | | | | | |
| E5(EPN,QC) | 2255 | 10.6370 | 10.5968 | 0.0403 | 1.4543 | 0.3786 | 1.3149 | <0.0001 |
| E6(EPN,QC) | 9566 | 11.4417 | 11.4375 | 0.0043 | 1.8560 | 0.0379 | 0.2282 | 0.6341 |
| E7(EPN,QC) | 11804 | 11.1632 | 11.9110 | -0.7477 | 2.0433 | -6.6980 | -39.7581 | <0.0001 |
| E8(EPN,QC) | 8933 | 12.7008 | 12.2174 | 0.4835 | 2.0754 | 3.8065 | 22.0173 | 0.2555 |
| E9(EPN,QC) | 232 | 12.8116 | 13.2040 | -0.3924 | 2.2702 | -3.0628 | 2.6327 | 0.0083 |
| E10(EPN,QC) | 533 | 9.9358 | 10.8550 | -0.9192 | 2.1670 | -9.2514 | -9.7929 | <0.0001 |
| E7(EPN,QC) appliqué sur | | | | | | | | |
| E5(EPN,QC) | 2255 | 10.6370 | 9.8450 | 0.7920 | 1.6652 | 7.4460 | 22.5867 | <0.0001 |
| E6(EPN,QC) | 9566 | 11.4417 | 10.6780 | 0.7638 | 2.0115 | 6.6757 | 37.1390 | <0.0001 |
| E7(EPN,QC) | 11804 | 11.1632 | 11.1543 | 0.0089 | 1.8949 | 0.0801 | 0.5128 | 0.9400 |
| E8(EPN,QC) | 8933 | 12.7008 | 11.4821 | 1.2187 | 2.3766 | 9.5952 | 48.4645 | <0.0001 |
| E9(EPN,QC) | 232 | 12.8116 | 12.4961 | 0.3155 | 2.3212 | 2.4629 | 2.0706 | 0.0385 |
| E10(EPN,QC) | 533 | 9.9358 | 10.1399 | -0.2041 | 1.9624 | -2.0539 | -2.4008 | 0.7487 |
| E8(EPN,QC) appliqué sur | | | | | | | | |
| E5(EPN,QC) | 2255 | 10.6370 | 11.0755 | -0.4385 | 1.5140 | -4.1219 | -13.7520 | 0.5868 |
| E6(EPN,QC) | 9566 | 11.4417 | 11.9333 | -0.4916 | 1.9247 | -4.2962 | -24.9788 | 0.0180 |
| E7(EPN,QC) | 11804 | 11.1632 | 12.4105 | -1.2473 | 2.2891 | -11.1731 | -59.1990 | 0.0034 |
| E8(EPN,QC) | 8933 | 12.7008 | 12.7014 | -0.0006 | 2.0123 | -0.0049 | -0.0291 | 0.6234 |
| E9(EPN,QC) | 232 | 12.8116 | 13.6729 | -0.8613 | 2.3671 | -6.7225 | -5.5419 | <0.0001 |
| E10(EPN,QC) | 533 | 9.9358 | 11.3089 | -1.3731 | 2.4191 | -13.8198 | -13.1044 | <0.0001 |
| E9(EPN,QC) appliqué sur | | | | | | | | |
| E5(EPN,QC) | 2255 | 10.6370 | 10.5431 | 0.0939 | 1.4946 | 0.8826 | 2.9830 | <0.0001 |
| E6(EPN,QC) | 9566 | 11.4417 | 11.3175 | 0.1243 | 1.8848 | 1.0861 | 6.4487 | <0.0001 |
| E7(EPN,QC) | 11804 | 11.1632 | 11.7392 | -0.5760 | 2.0335 | -5.1594 | -30.7714 | <0.0001 |
| E8(EPN,QC) | 8933 | 12.7008 | 11.9701 | 0.7308 | 2.1739 | 5.7537 | 31.7712 | <0.0001 |
| E9(EPN,QC) | 232 | 12.8116 | 12.8018 | 0.0098 | 2.1397 | 0.0768 | 0.0701 | 0.9444 |
| E10(EPN,QC) | 533 | 9.9358 | 10.7048 | 0.7690 | 2.1368 | -7.7396 | -8.3083 | <0.0001 |
| E10(EPN,QC) appliqué sur | | | | | | | | |
| E5(EPN,QC) | 2255 | 10.6370 | 9.6174 | 1.0196 | 1.7781 | 9.5857 | 27.2314 | <0.0001 |
| E6(EPN,QC) | 9566 | 11.4417 | 10.4637 | 0.9781 | 2.1005 | 8.5485 | 45.5440 | <0.0001 |
| E7(EPN,QC) | 11804 | 11.1632 | 10.9467 | 0.2165 | 1.9079 | 1.9396 | 12.3299 | 0.2152 |
| E8(EPN,QC) | 8933 | 12.7008 | 11.2724 | 1.4284 | 2.4843 | 11.2467 | 54.3449 | <0.0001 |
| E9(EPN,QC) | 232 | 12.8116 | 12.2777 | 0.5339 | 2.3352 | 4.1674 | 3.4826 | <0.0001 |
| E10(EPN,QC) | 533 | 9.9358 | 9.9211 | 0.0147 | 1.9497 | 0.1482 | 0.1743 | <0.0001 |

N : Nombre d'observation, \bar{H} : moyenne des hauteurs réelles en mètre, \hat{H} : moyenne des hauteurs prédites en mètre, $\bar{\epsilon}$: moyenne de l'erreur prédite (m), S_{ϵ} : écart-type moyen de l'erreur prédite

3.2.1 Erreurs moyennes associées à la prédiction des hauteurs

Les tableaux 3.3 à 3.8 présentent les principaux résultats statistiques relatifs à l'erreur moyenne de prédiction des hauteurs des peuplements étudiés (\bar{e}). Dans un premier temps, les tableaux 3.3 et 3.4 exposent l'erreur moyenne associée à la prédiction des hauteurs des pinèdes grises (tableau 3.3) et des épinettes noires (tableau 3.4) lorsque les deux modèles albertains et québécois sont appliqués à leurs écorégions respectives. Par contre, les tableaux 3.5 à 3.8 révèlent les valeurs statistiques dérivées de l'erreur moyenne de prédiction des hauteurs des deux peuplements étudiés lorsque les modèles écorégionaux albertains et québécois sont appliqués à leurs écorégions respectives. Ainsi, les erreurs moyennes de prédictions des hauteurs des pinèdes grises et des épinettes noires, engendrées par l'application des modèles provinciaux à leurs écorégions respectives, sont toutes inférieures à 1 mètres (tableau 3.3 et 3.4) sauf lorsque le modèle provincial albertain des pinèdes grises (tableau 3.3) est appliqué à E4(PG,AB) ($\bar{e} = 1.75$ mètres).

Par ailleurs, la figure 3.1 illustre la moyenne des erreurs associées à la prédiction des hauteurs des peuplements étudiés à travers les classes de 5 centimètres d'intervalle du DHP, et ce, lorsque les modèles provinciaux albertains et québécois sont appliqués à leurs écorégions respectives. Ainsi, il n'existe pratiquement pas d'erreurs de prédiction des hauteurs des pinèdes grises à l'échelle provinciale et écorégionale de l'Alberta excepté pour l'écorégion E4(PG,AB). Toutefois, cette valeur reste négligeable pour le DHP mesurant entre 0 et 5 cm (graphe (a)). Pour ce qui est des erreurs de prédiction de la hauteur des pinèdes grises au Québec (graphe (b)) et épinettes noires en Alberta (graphe (c)), elles sont insignifiantes vu que la valeur de la moyenne des erreurs est seulement de quelques millimètres. Par contre, la valeur de l'erreur de prédiction des hauteurs des épinettes noires au Québec pour le modèle provincial est d'environ -1 mètre pour la classe de DHP de 30-35cm et d'environ -2.5 mètres pour la classe de DHP allant de 40 à 45 cm (graphe (d)).

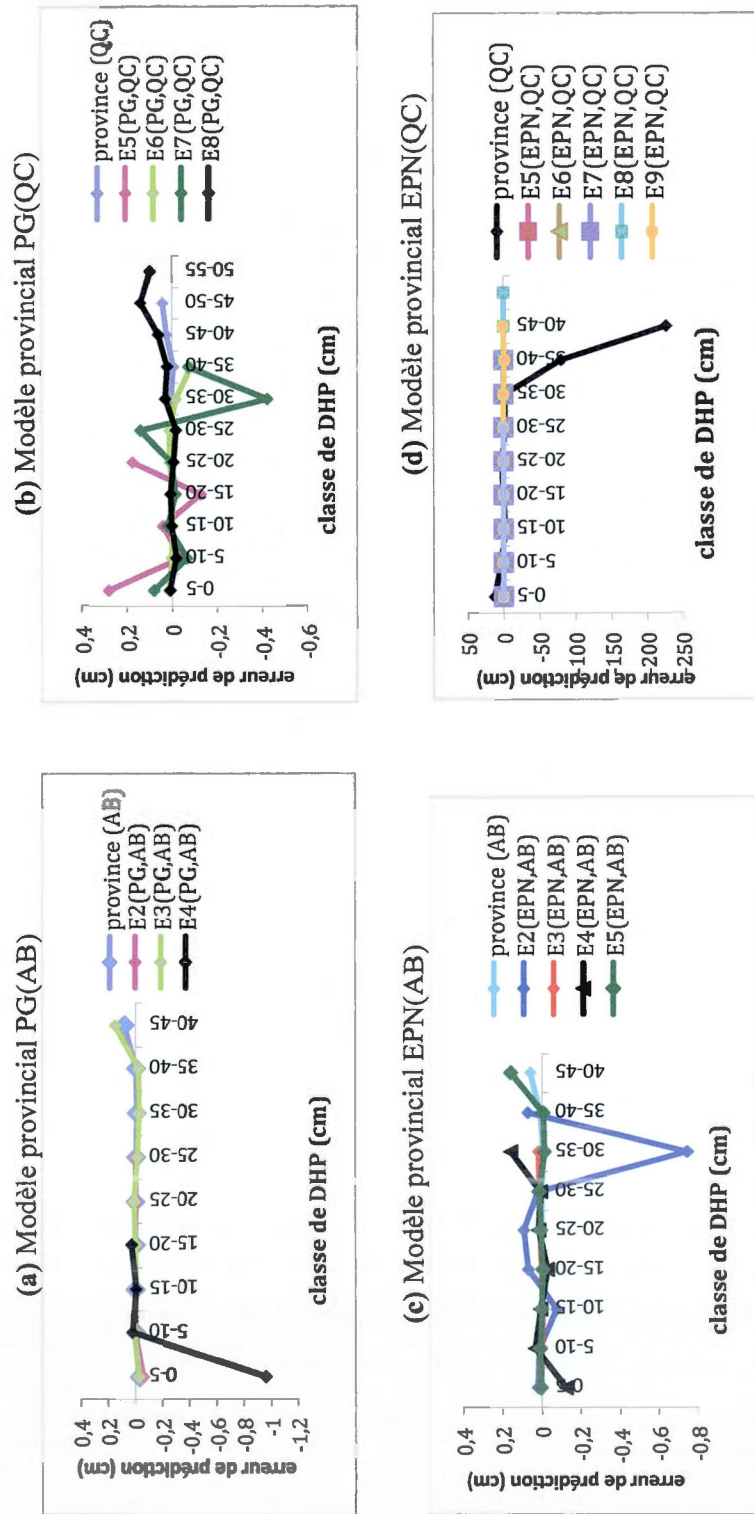


Figure 3.1 Moyenne des erreurs associée aux hauteurs prédites (cm) en fonction des classes de DHP (cm) lorsque les modèles provinciaux sont appliqués à leur écorégions respectives

3.2.2 Biais de prédiction des hauteurs

Outre le calcul de l'erreur moyenne associée à la prédiction des hauteurs des peuplements considérés lors de cette étude, il est judicieux que ces appréciations ne soient pas biaisées. De ce fait, les tableaux 3.3 et 3.4 dévoilent les valeurs de biais de prédiction des hauteurs des pinèdes grises et des épinettes noires lorsque le modèle provincial albertain et le modèle provincial québécois sont appliqués à leurs écorégions respectives. Ainsi, l'utilisation des deux modèles provinciaux pour prédire la hauteur totale des deux peuplements étudiés propre à chaque province et écorégion a abouti à une sous ou sur-prédiction. Autrement dit, les valeurs de p sont toutes inférieures à 0.05 sauf pour l'écorégion E9(EPN,QC) (tableau 3.3 et 3.4).

Les valeurs ainsi amassées indiquent que les biais des hauteurs des pinèdes grises et des épinettes noires sont généralement en dessous de 6%. Autrement dit, l'écart entre l'ensemble des valeurs prédites et observées est inférieur à 6% sauf pour les écorégions E4(PG,AB) et E2(EPN,AB) où l'écart s'approche respectivement de 11% et -11% (tableaux 3.3 et 3.4 : Biais (%)).

Les modèles écorégionaux des deux peuplements considérés dans cette étude ont été testés sur toutes les écorégions de l'Alberta et du Québec. Les tests statistiques des tableaux 3.5 à 3.8 montrent qu'il y a des différences significatives entre la hauteur observée et la hauteur prédite lorsque les modèles écorégionaux sont appliqués au niveau de leurs écorégions respectives (valeur de $p < 0.05$). L'application inadéquate du modèle hauteur-diamètre sur les différentes échelles est expliquée par le biais de prédiction (Peng *et al.*, 2004). Généralement, les biais associés à la prédiction des hauteurs des peuplements considérés sont en deçà de 8% mais des écarts entre les hauteurs prédites et observées peuvent atteindre des valeurs de -17% (tableau 3.5) et 15% (tableaux 3.7).

Le tableau 3.9 résume les résultats statistiques lorsque le modèle provincial québécois est appliqué sur les données dendrométriques de l'Alberta et inversement, et ce, pour les pinèdes grises et les épinettes noires. À titre d'exemple, le test statistique, suite à l'utilisation du modèle du Québec dans le but de prédire les hauteurs des pinèdes grises en Alberta, s'avère être non significatif (valeur de $p > 0.05$) avec une sous-estimation de 14.13% et une erreur de 2.21 mètres ont été relevées. Par contre lorsque le modèle albertain est appliqué pour la prédiction de la hauteur des pins gris en Alberta, l'écart entre les hauteurs prédites et observées est de seulement -0.04% (tableau 3.9).

Tableau 3.9 Prédiction des hauteurs des pins gris et des épinettes noires relatives à l'application des modèles provinciaux

| Modèle | N | \bar{H} | \hat{H} | e' | Se | Biais (%) | t | P-value |
|-------------------------|-------|-----------|-----------|---------|--------|-----------|---------|---------|
| Pins Gris | | | | | | | | |
| Modèle QC sur AB | 2816 | 15.6903 | 13.4732 | 2.2170 | 2.9636 | 14.1300 | 8.3262 | <0.0001 |
| Modèle QC | 6080 | 12.5042 | 12.4956 | 0.0176 | 2.5643 | 0.1404 | 9.7501 | 0.7928 |
| Modèle AB sur QC | 6080 | 12.5042 | 14.8330 | -2.3288 | 3.5162 | -18.6239 | 9.7501 | <0.0001 |
| Modèle AB | 2816 | 15.6903 | 15.6980 | -0.0078 | 1.8855 | -0.0494 | 8.3262 | 0.8274 |
| Épinettes noires | | | | | | | | |
| Modèle QC sur AB | 12017 | 11.6956 | 9.8450 | 1.8506 | 2.7313 | 15.8230 | 12.8210 | <0.0001 |
| Modèle QC | 33323 | 11.6116 | 11.6144 | -0.0028 | 1.9631 | -0.0238 | 21.1965 | 0.7969 |
| Modèle AB sur QC | 33323 | 11.6116 | 13.6463 | -2.0347 | 2.8378 | -17.5228 | 21.1965 | <0.0001 |
| Modèle AB | 12017 | 11.6956 | 11.7407 | -0.0451 | 1.9759 | -0.3853 | 12.8210 | 0.1624 |

N : Nombre d'observation, H(m) : moyenne des hauteurs réelles, \hat{H} (m) : moyenne des hauteurs prédites, e' : moyenne de l'erreur prédite, Se : écart type moyen de l'erreur prédite

Par ailleurs, la figure 3.2 montre la variation de la relation hauteur-diamètre des pinèdes grises et des épinettes noires en Alberta et au Québec. Il est évident que les deux courbes affichent la même allure. Néanmoins, les courbes ne sont pas superposées autrement dit elles ne sont pas identiques pour les deux provinces. En effet, la croissance en hauteur des pinèdes grises (graphique a) et des épinettes noires (graphique b) en Alberta est nettement meilleure que celle observée au Québec.

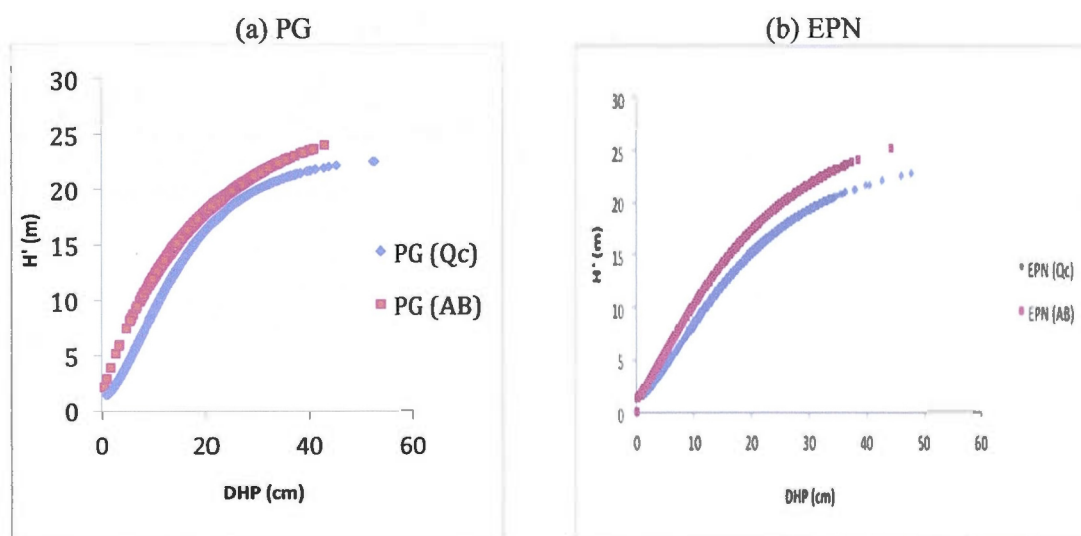


Figure 3.2 Comparaison de la relation hauteur-DHP du pin gris (graphe a) et de l'épinette noire (graphe b) entre le Québec et l'Alberta

3.2.3 Écarts-types des erreurs associés à la prédiction des hauteurs

La moyenne des écarts types d'erreurs de prévision de la hauteur des pinèdes grises en Alberta varie de 1,5 à 2,5 mètres avec la plus petite valeur observée pour la classe 5-10 cm de DHP et la plus grande valeur pour un DHP supérieur à 35 cm (figure 3.3 (a)). En ce qui concerne le modèle provincial québécois de prédiction de la hauteur des pinèdes grises, la moyenne des écarts types d'erreurs de prévision varie de 0,25 à 1,5 mètres avec la plus petite valeur observée pour la classe 30-35 cm de DHP et la plus grande valeur pour la classe 5-10 cm de DHP (figure 3.3 (b)).

Concernant la moyenne des écarts types d'erreur de prévision de la hauteur des épinettes noires en Alberta par classe de diamètres, elle varie de 1,5 à 2,5 mètres avec la plus petite valeur observée pour la classe 0-5 cm de DHP et la plus grande valeur pour des DHP supérieur à 35 cm (figure 3.3 (c)). Pour le modèle à l'échelle du Québec, la moyenne des écarts types d'erreur de prévision varie de 0,25 à 4 mètres avec la plus petite valeur observée pour la classe 30-35 cm de DHP et la plus grande valeur pour la classe de DHP supérieur à 35 cm (figure 3.3 (d)).

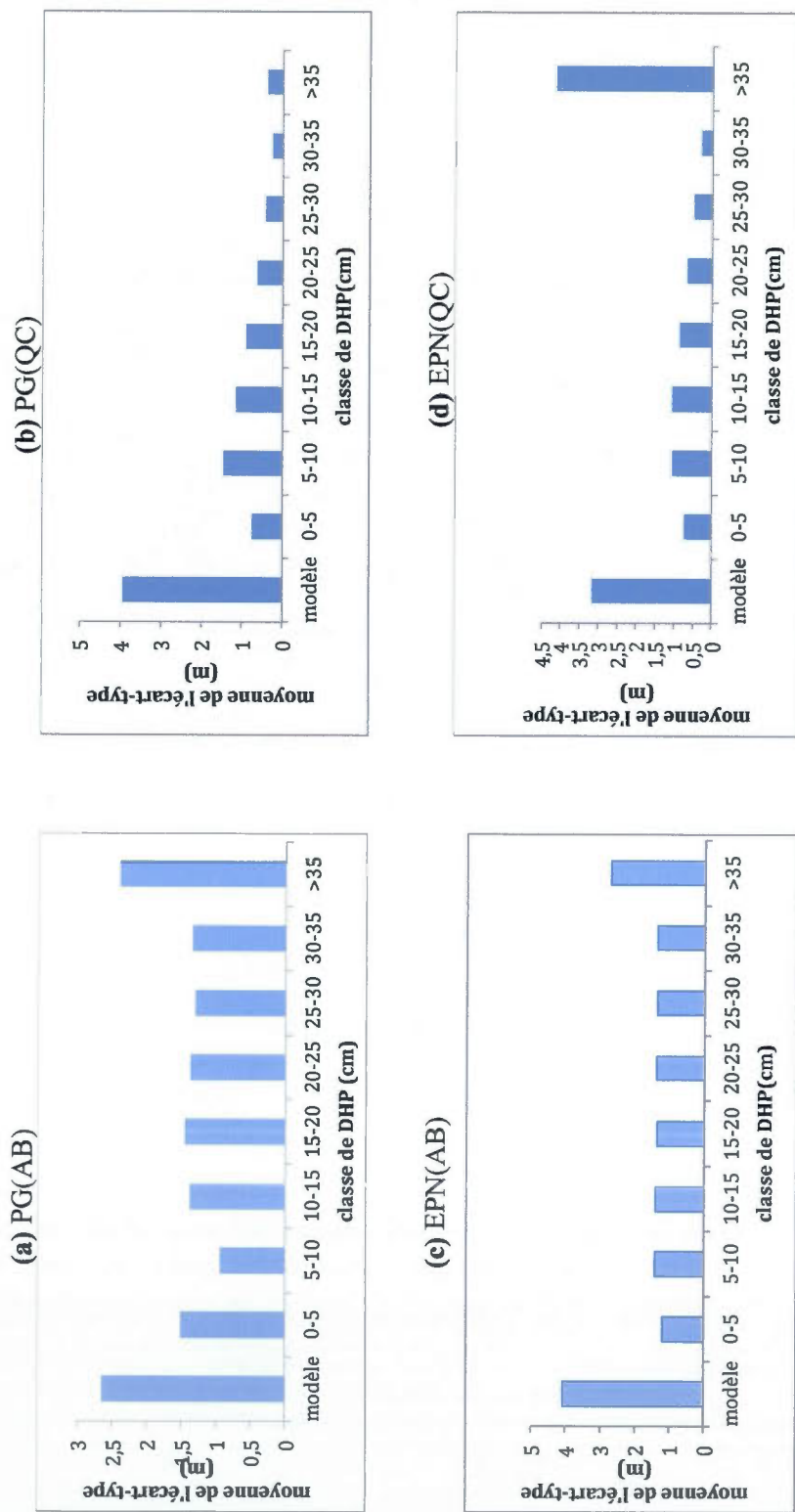


Figure 3.3 Moyenne des écarts-types de l'erreur associée à la prédiction des hauteurs (m) en fonction de classes de DHP(cm) pour les pinèdes grises (graphes a et b) et les épinettes noires (graphes c et d) en Alberta et au Québec. Le modèle représente la moyenne des écarts-types de l'erreur de prédiction des hauteurs pour toutes les classes de DHP(cm)

Outre l'analyse des écarts-types et des biais liés aux erreurs de prédictions, il est important d'évaluer la variation entre les hauteurs observées et prédites (en mètres) en fonction des DHP (en centimètres). Ainsi, la figure 3.4 illustre cette variation pour les peuplements suivants : les pinèdes grises de l'Alberta (graphe (a)), les pinèdes grises du Québec (graphe (b)), les épinettes noires de l'Alberta (graphe (c)) et les épinettes noires du Québec (graphe (d)). Ces variations (ΔH) s'échelonnent généralement entre -5 et 5 mètres pour des DHP mesurant entre 0 et 30 centimètres (figure 3.4). Les variations positives et négatives sont respectivement dues à une sous et sur-estimation qui produisent des biais positifs et négatifs (tableau 3.3 et 3.4).

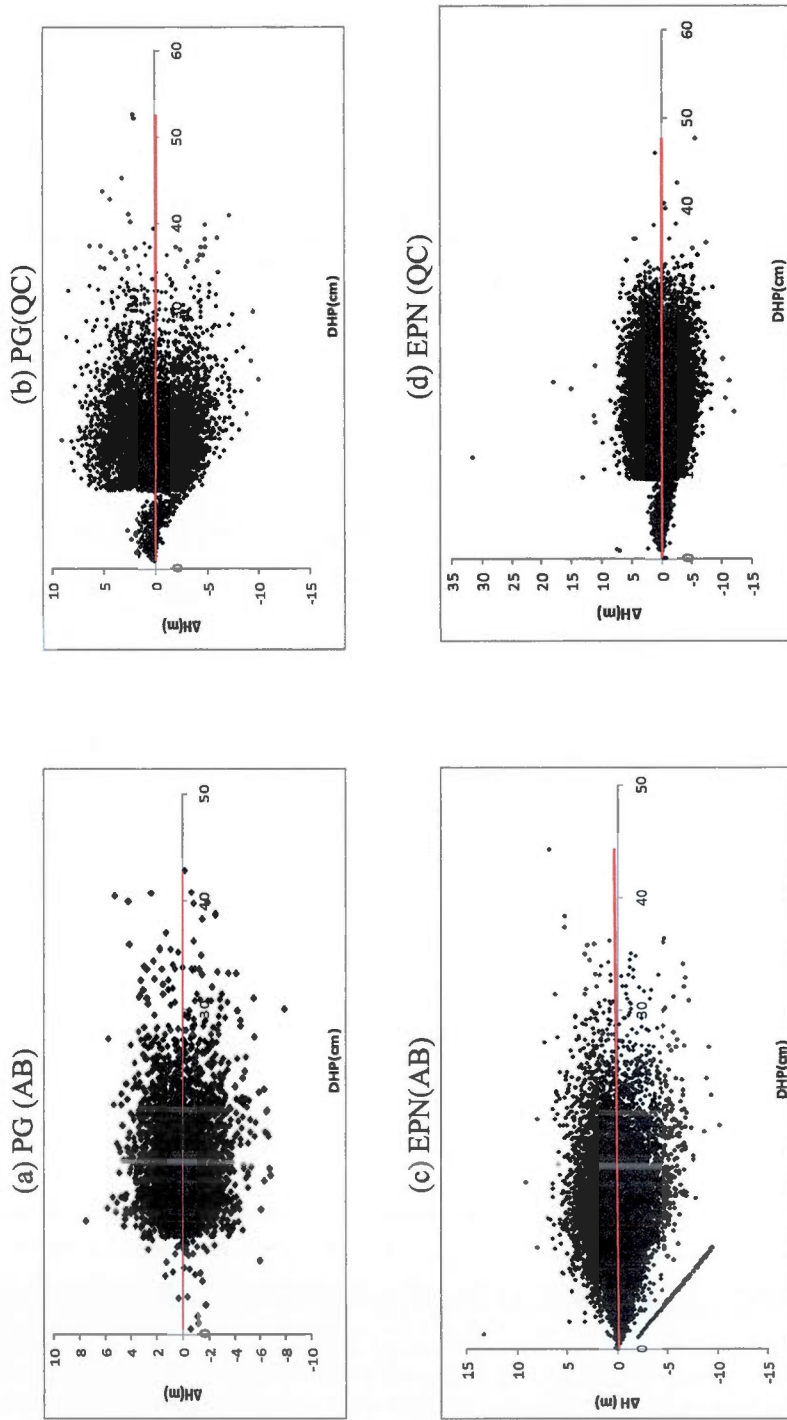


Figure 3.4 Variation de la hauteur réelle et prédite (m) en fonction du DHP (cm) du pin gris (graphes a et b) et de l'épinette noire (graphes c et d) en Alberta et au Québec

CHAPITRE IV

DISCUSSION

Pothier et Savard (1998) pensent que l'évaluation d'un modèle représente un aspect fondamental de la modélisation forestière puisqu'il existe une forte relation entre le niveau de confiance des utilisateurs et les prédictions générées par le modèle utilisé.

Bien que le nombre de PEP en l'Alberta, utilisé pour cette étude, n'est pas aussi élevé qu'on l'aurait souhaité ; cela n'empêcherait en aucun cas le développement des modèles hauteur-diamètre. En effet, Peng *et al.* (2001) ont développé un modèle écorégional pour les épinettes noires en Ontario avec un nombre d'observations atteignant seulement 172. Pothier et Savard (1998), quant à eux, ont développé et évalué leur modèle avec seulement 8 PEP pour les épinettes blanches au Québec. Pour toutes ces raisons, l'approche empirique utilisée pour le développement des modèles hauteur-diamètre considérés par cette étude est meilleure que les autres approches (approche semi-empirique et approche théorique) qui sont fréquemment adoptées par d'autres études. De plus, Pothier et Savard (1998) et Avery et Burkhart (1983) pensent qu'il serait mieux de dissocier l'approche empirique de l'unique usage des tables de production pour des peuplements forestiers de densité moyenne puisque ces tables caractérisent également les peuplements à forte et à faible densité.

Par ailleurs, les 4964 placettes québécoises totalisent 198.56 ha dans lesquelles 33323 arbres ont été échantillonnés, ce qui donne une densité d'échantillonnage de 167.8 tiges d'épinettes noires/ha au Québec. Concernant l'Alberta, la densité d'échantillonnage est de 817.5 tiges d'épinettes noires/ha (tableaux 2.1 et 2.2).

Concernant les pins gris, la densité d'échantillonnage est de 55.67 tiges de pin gris/ha au Québec, contrairement à la forte densité d'échantillonnage retrouvée en Alberta et qui représente 1042.22 tige de pin gris/ha (tableaux 2.1 et 2.2). D'après ces résultats, les épinettes noires et les pins gris échantillonnés en Alberta sont beaucoup plus proches les uns des autres que ceux qui ont été sélectionnés au Québec. Cette constatation indiquerait que les arbres au Québec se trouvent au sein de peuplements mixtes et que les arbres en Alberta poussent plutôt en peuplements purs.

La fonction Chapman-Richards (Chapman, 1961 ; Richards, 1959) utilisée pour le développement des modèles considérés par cette étude a été adoptée par des chercheurs comme Huang (1999) qui a utilisé cette fonction pour le développement des modèles hauteur-diamètre pour les épinettes blanches en Alberta ou encore Peng *et al.* (2001) qui ont adopté cette fonction pour le développement des modèles pour les épinettes noires et les pinèdes grises en Ontario. Les résultats présentés dans cette étude suggèrent que cette fonction a également été bien adoptée pour décrire les relations hauteur-diamètre des pinèdes grises et des épinettes noires en Alberta et au Québec. Dans notre recherche, les hautes valeurs des coefficients de détermination des modèles développés pour les pinèdes grises et les épinettes noires à l'échelle provinciale et écorégionale de l'Alberta et du Québec montrent que cette fonction donne d'excellents modèles (tableaux 3.1 et 3.2). D'après Peng (1999) et Peng *et al.* (2001) le coefficient de détermination doit être grand car des valeurs se rapprochant de 1 indiquent une bonne relation linéaire entre les variables étudiées et une excellente prédiction de la hauteur à partir du diamètre. De ce fait, chacun des modèles conçus pour les pinèdes grises en Alberta et au Québec exprime au moins 89% de la variation totale de la hauteur (tableau 3.1) et au moins 94% de la variation totale de la hauteur des épinettes noires dans les deux provinces considérées par cette étude (tableau 3.2).

Par ailleurs, les coefficients de la fonction Chapman-Richards sont variables pour les vingt et un modèles développés pour cette étude (tableaux 3.1 et 3.2). Toutefois, une grande valeur de l'asymptote (a) a été relevée pour l'écorégion E2(EPN,QC)¹ (tableau 3.2). Selon Peng *et al.* (2001) ce résultat est dû aux arbres de petites tailles. En effet, le diamètre moyen ainsi que la

¹ Les codes sont utilisés pour alléger le texte (se référer au tableau A.3)

hauteur moyenne pour l'écorégion E2(EPN,QC) sont relativement petits par rapport à ceux des autres écorégions (tableau 2.6).

Généralement, l'évaluation des modèles provinciaux appliqués à leurs écorégions respectives montre que les biais de prédiction des hauteurs des pinèdes grises et des épinettes noires au Québec et en Alberta sont inférieurs à 6% et que l'erreur associée à ces prédictions est en deçà de 0.7 mètres (tableaux 3.3 et 3.4). Toutefois, des valeurs inhabituelles de biais de prédiction de la hauteur ont été remarquées au niveau de l'écorégion E4(PG,AB) avec un nombre d'observations de 227 (tableau 3.3) ainsi qu'au niveau de l'écorégion E2(EPN,AB) dont le nombre d'observations atteint 710 (tableau 3.4). Ces résultats sont tout à fait prévisibles puisque Pothier et Savard (1998) considèrent que les prédictions tendent à être sans biais lorsque la taille de l'échantillon est plutôt grande.

Par ailleurs, l'application des deux modèles provinciaux à l'échelle provinciale et écorégionale respectives engendre une sous-estimation (% biais positif) ou une surestimation (biais négatif (%)) (Peng *et al.*, 2004) de la prédiction de la hauteur des peuplements considérés par cette étude (tableaux 3.3 et 3.4) avec des valeurs de $p < 0.05$ pour toutes les écorégions sauf pour l'écorégion E9(EPN,QC) (tableaux 3.4). Ajouté à cela, la figure 3.4 reflète la variation entre les hauteurs réelles et prédites en fonction des DHP qui se situe généralement entre -5 et 5 mètres. Pothier et Savard (1998) considèrent que les variations positives et négatives sont également dues à une sous et surestimation de la prédiction de la hauteur des pinèdes grises et des épinettes noires. D'autre part, les moyennes des erreurs de prédiction des hauteurs des épinettes noires et des pinèdes grises par classe de DHP ne dépassent pas un centimètre (figure 3.1) sauf lorsque le modèle provincial québécois des épinettes noires est appliqué à l'échelle provinciale. En effet, la moyenne des erreurs associées à la prédiction des hauteurs épinettes noires à l'échelle provinciale du Québec atteint -2.5 mètres (figure 3.1, graphe (d)) avec un écart-type moyen d'à peu près 4 mètres (figure 3.3, graphe (d)) pour un DHP supérieur à 35 cm. D'après Peng *et al.* (2004), lors du développement des modèles hauteur-diamètre pour les épinettes noires à l'échelle provinciale et écorégionale de l'Ontario, les biais négatifs sont dus à une surestimation de la hauteur engendrée par les arbres ayant un DHP supérieur à 30 cm alors que les biais positifs dus à une sous-estimation de la hauteur sont générés par les arbres dont le DHP est inférieur à 25

cm. Dans une autre étude, Peng (1999) rapporte que Zhang, Moore et Newberry (1995) pensent que l'utilisation du modèle hauteur-diamètre dans le but d'extrapoler au delà de la base de données peut augmenter le degré de la sous ou de la surestimation des arbres selon leurs tailles. Il est à noter que ces chercheurs prennent en considération les erreurs de prédictions qui sont au delà de 1,5 mètres. En prenant en considération ces constatations, la sous ou la surestimation de la hauteur des arbres pourrait avoir des répercussions sur le calcul de la possibilité forestière notamment pour l'estimation de la biomasse aérienne qui pourrait être biaisée. En effet, les équations de la biomasse ont souvent recours à la hauteur prédite des arbres en tant que variable explicative (Case et Hall, 2008).

Peng *et al.* (2001) et Peng *et al.* (2004) pensent que l'application inadéquate des modèles est expliquée par les biais et les erreurs de prédiction. En effet, l'application du modèle provincial albertain sur la province du Québec et inversement induit, d'une part, d'importants biais associés à la prédiction des hauteurs des pinèdes grises et des épinettes noires qui varient de 14% à 18% et d'autre part, les erreurs associées à ces prédictions sont significatives au seuil de 5% (tableau 3.9). Ainsi, ces résultats obtenus confirment notre hypothèse de départ qui suggère que l'utilisation du modèle provincial albertain ou québécois, dans le but de prédire la hauteur des peuplements étudiés dans une province où il n'a pas été paramétré, engendre à la fois des biais et des erreurs quant à la prédiction des hauteurs des pinèdes grises et des épinettes noires. Par conséquent, nos résultats suggèrent que les équations qui utilisent comme variable explicative la hauteur prédite pour estimer la biomasse à l'échelle nationale seront forcément biaisées dans les régions où elles n'ont pas été paramétrées. Ajouté à cela, la relation hauteur-diamètre pour les pinèdes grises et les épinettes noires au Québec et en Alberta ne sont pas identiques (figure 3.2) ce qui confirme une fois de plus notre deuxième hypothèse. Selon Huang, Price et Titus (2000) et Peng *et al.* (2004) les relations hauteur-diamètre des pinèdes grises et des épinettes noires varient en fonction des gradients géographiques et sont par conséquent dépendants des variations environnementales.

Effectivement, nos résultats suggèrent que ces deux espèces ont une meilleure croissance du point de vue hauteur et diamètre en Alberta (figure 3.2). Ces résultats pourraient être expliqués par les hautes altitudes retrouvées en Alberta (tableau A.1) qui favoriseraient la

croissance des pinèdes grises et des épinettes noires. En effet, Farrar (1995) pense que ces deux espèces ont une meilleure croissance sur les hautes terres bien drainées du Canada. De plus, beaucoup plus de sols au Québec sont organiques (tableau A.2), or la croissance des épinettes noires et des pinèdes grises s'avère être faible sur ces sols (Sims, Kershaw et Wickware, 1990 ; Viereck et Johnston, 1990). Par ailleurs, il se trouve que l'Alberta soit caractérisée par des étés et des printemps chauds et pluvieux (Alberta Natural Regions Committee, 2006) et que l'augmentation de la croissance du pin gris coïnciderait avec des températures plus élevées et des précipitations printanières plus abondantes (Brooks, Flanagan et Ehleringer, 1998). En effet, des températures printanières plus chaudes favoriseraient la productivité de la végétation en prolongeant la saison de croissance (Walther *et al.*, 2002). D'autre part, Brooks, Flanagan et Ehleringer (1998) pense que la croissance radiale annuelle des épinettes noires est réduite par l'augmentation des températures tout au long des saisons et qui est induite par le réchauffement climatique. En effet, l'impact des changements climatiques sur les forêts boréales de l'Est de l'Amérique du Nord a causé un déclin quant à la croissance de l'épinette noire et du pin gris pour la période allant de 1950 à 2005 (Girardin *et al.*, 2012).

Par ailleurs, l'évaluation des modèles écorégionaux appliqués à leurs propres écorégions montre à la fois qu'il n'y a pas de biais ni d'erreurs associés à la prédiction des hauteurs des pinèdes grises et des épinettes noires au Québec et en Alberta (tableaux 3.5 à 3.8). Par contre lorsqu'un modèle écorégional est utilisé dans des écorégions où il n'a pas été paramétré, il produit des biais et des erreurs associés à la prédiction des hauteurs des deux espèces considérées par cette étude (tableaux 3.5 à 3.8). Cependant, un modèle écorégional peut produire des erreurs de prédiction des hauteurs non significatives même quand il est appliqué à une écorégion dans laquelle il n'a pas été développé. À titre d'exemple, l'application du modèle E6(PG,QC) sur les écorégions E5(PG,QC) et E7(PG,QC) a engendré des erreurs de prédiction de la hauteur non significatives ($p > 0.05$) (tableau 3.7). D'après Peng *et al.* (2004), de tels résultats sont dus au fait que les écorégions peuvent avoir les mêmes conditions environnementales telles que le climat, la texture du sol et les feux de forêts. En effet, les écorégions (E5,QC), (E6,QC) et (E7,QC) ont pratiquement le même régime climatique et des conditions édaphiques quasiment semblables (tableau A.2) (Marshall et Schut, 1999). Par conséquent, les résultats obtenus par cette recherche s'accordent aux résultats des études de

Peng *et al.* (2001) et Peng *et al.* (2004) qui suggèrent, d'une part, que les modèles écorégionaux sont plus précis que les modèles provinciaux et d'autre part, que les modèles écorégionaux dépendent des conditions environnementales des régions dans lesquelles ils ont été développés.

CHAPITRE V

CONCLUSION

La présente recherche propose vingt et un modèles hauteur-diamètre pour les épinettes noires et les pinèdes grises à l'échelle provinciale et écorégionale du Québec et de l'Alberta. Les modèles en question ont été développés en se basant sur la fonction non linéaire de Chapman-Richards qui représente une grande amélioration par rapport aux modèles linéaires utilisés auparavant.

Le coefficient de détermination (R^2) ainsi que la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM) révèlent que la fonction non linéaire de Chapman-Richards s'est bien ajustée aux données dendrométriques amassées pour notre étude afin de modéliser la relation hauteur-diamètre des pinèdes grises et des épinettes noires au Québec et en Alberta autant sur le plan provincial qu'écorégional.

Par ailleurs, l'évaluation du modèle provincial albertain ainsi que du modèle provincial québécois, développés pour cette étude, a démontré qu'ils sont précis à l'échelle provinciale. Par contre, ces modèles s'avèrent être biaisés pour prédire la hauteur des pinèdes grises et des épinettes noires à l'échelle écorégionale du Québec et de l'Alberta. De plus, nos résultats suggèrent que les modèles écorégionaux albertains et québécois sont performants dans l'écorégion où ils ont été paramétrés. Ces résultats s'accordent aux études de Peng *et al.*

(2001) et de Peng *et al.* (2004) qui suggèrent que la relations hauteur-diamètre des arbres varie selon les sites et qui plus est étroitement liée aux variations environnementales locales.

Outre l'évaluation des modèles développés à l'échelle écorégionale, nous avons évalué la performance du modèle albertain à l'échelle québécoise et inversement et à notre connaissance cette approche est pionnière dans le domaine forestier. La raison pour laquelle nous avons entrepris cette étude est que les gestionnaires forestiers ont tendance à estimer la biomasse ainsi que le volume des arbres à l'échelle nationale en utilisant des équations qui tiennent compte de la hauteur prédite en tant que variable explicative. Or, tel expliqué dans la problématique de la présente recherche, plusieurs régions canadiennes non pas été paramétrées. Par conséquent, notre étude montre que cette approche introduit d'importants biais et conséquemment de mauvaises estimations de la biomasse, du volume de bois marchand ce qui représente davantage un problème pour l'estimation des stocks de carbone. En effet, en évaluant la performance du modèle albertain à l'échelle québécoise et inversement nous avons montré d'une part que d'importants biais ont été relevés et d'autre part que l'erreur associées à la prédiction des hauteurs des deux espèces considérés par cette étude est significative d'où la différence de la relation hauteur-diamètre entre le Québec et l'Alberta. Effectivement, il semble que les deux conifères ont une meilleure croissance en Alberta ce qui appuie une fois de plus la théorie de Peng *et al.* (2001) et de Peng *et al.* (2004) qui suggère que la relation hauteur-diamètre est étroitement liée aux variations environnementales et que l'utilisation d'une seule relation hauteur-diamètre induirait de mauvaises estimations de la hauteur des peuplements.

Par ailleurs, la différence de la croissance des pinèdes grises et des épinettes noires entre les deux provinces a été expliquée d'une façon sommaire. Par conséquent, des recherches d'ordre climatiques et édaphiques s'imposent afin de déterminer le(s) facteur(s) responsable(s) de la différence de la croissance des deux espèces entre le Québec et l'Alberta d'une part et d'autre part, de mieux comprendre les variations de la relation hauteur-diamètre à grandes échelles.

À la lumière des résultats obtenus lors de cette étude, les hauteurs prédites des épinettes noires et des pinèdes grises, obtenues grâce au développement des modèles non linéaires au Québec et en Alberta, peuvent servir de variables explicative pour le calcul de la possibilité forestière par les gestionnaires sylvicoles. Cependant, il est préférable d'utiliser la hauteur qui a été prédite à partir des modèles écorégionaux puisqu'elle jouit, à notre connaissance, d'une précision sans précédent.

APPENDICE A

Tableau A.1 Caractéristiques des écorégions albertaines (Alberta Natural Regions Committee, 2006)

| Écorégion | Code | Altitude (m) | Climat | Végétation | Sol |
|-------------------------------|---------|--------------|-----------------------------|---|--|
| Écorégion boréale subarctique | (E1,AB) | 825 | T(°C)= -3.4 P(mm)= 512.3 | pauvres en espèces forestières | organiques, luvisols gris, mésisols, brunisols et gleysols |
| Les terres boréales du Nord | (E2,AB) | 350 | T(°C)= -2.5 P(mm)= 386.8 | épinettes noires et blanches, pin gris, quelques mélèzes. | luvisols gris, brunisols, cryosols, mésisols, gleysols |
| Forêt boréale mixte | (E3,AB) | 525 | T(°C)= 0.2 P(mm)= 477.5 | épinette noire et blanche, pin gris et pin tordu | luvisols gris, brunisols, mésisols cryosols |
| Les contreforts | (E4,AB) | 950 | T(°C)= -1.0 P(mm)= 495.2 | épinette noire, pin gris bouleau blanc et mélèze | luvisols gris, brunisols et régosols |
| Les hautes terres boréales | (E5,AB) | 1300 | T(°C)= -1.5 P(mm)= 534.5 | pins tordus, épinettes noires et mélèzes | brunisols, luvisols gris, mésisols gleysols |
| Écorégion subalpine | (E6,AB) | 2350 | T(°C)= -0.1 P(mm)= 755.5 | pins tordus, pins blancs épinettes d'Englemann | brunisols et régosols |
| Écorégion des montagnes | (E7,AB) | 1400 | T(°C)= 2.3 P(mm)= 598.6 | pins flexibles, pins tordus sapins de Douglas | régosols et brunisols |

Altitude moyenne en mètre. T(°C) : température annuelle moyenne en degré celsius. P(mm) : précipitation annuelle moyenne en millimètre

Tableau A.2 Caractéristiques des écorégions du Québec (Marshall et Schut, 1999)

| Écorégion | Code | Altitude (m) | Climat | Végétation | Sol |
|---|----------|--------------|------------------------------------|--|---|
| Toundra du moyen-arctique | (E1,Qc) | 100 à 520 | T(°C)= -8,5 P(mm)= 200 à 300 | bouleau glanduleux, saules lédon palustre, dryades | cryosols turbiques et pergélisol |
| Toundra du bas-arctique | (E2,Qc) | 200 à 500 | T(°C)= -7 P(mm)= 400 à 500 | bouleau glanduleux, saules, lédon palustre, dryades. | cryosols turbiques et pergélisol |
| Toundra des monts Torngat | (E3,Qc) | - | T(°C)= -6 P(mm)= 400 à 700 | bouleau à papier, saules, épinette noire | cryosols, régosols et pergélisol |
| Taïga de l'Est du Bouclier canadien | (E4,Qc) | - | T(°C)= -1 à -5 P(mm)= 500 à 800 | épinette blanche, mélèze saule, sapin baumier | brunisol, pergélisol, cryosols, podzols humo-ferriques |
| Taïga du Sud de la baie James | (E5,Qc) | 700 à 800 | T(°C)= -2 P(mm)= 700 à 800 | épinettes noires, pin gris bouleau à papier | brunisol, mésisol, fibrisol pergélisol, organiques |
| Forêts centrales du Bouclier canadien | (E6,Qc) | 300 à 760 | T(°C)= 0 P(mm)= 650 à 900 | épinette noire, pins gris bouleau à papier | luvisols, gleysols, mésisols, fibrisol, organiques |
| Forêts de l'est du Canada | (E7,Qc) | 400 à 600 | T(°C)= 1 P(mm)= 800 à 1100 | épinette noire, pins gris sapins baumier | brunisol, mésisol, luvisols podzols humo-ferriques, organiques |
| Forêts transitionnelles De l'est | (E8,Qc) | 300 à 600 | T(°C)= 1,5 P(mm)= 800 à 1000 | épinette noire, bouleau à papier, sapins baumier | brunisol, mésisol, podzols humo- ferriques, organiques |
| Forêts des basses-Terres de l'Est des grands lacs | (E9,Qc) | 152 | T(°C)= 5 P(mm)= 800 à 1000 | épinette noire et blanches bouleau jaune, chêne rouge | brunisol, gleysols, podzols humo- ferriques |
| Forêts de la Nouvelle Angleterre et de L'Acadie | (E10,Qc) | 400 à 600 | T(°C)= 3,5 P(mm)= 900 à 1300 | épinette noire, bouleau à papier, sapin baumier | brunisol, gleysols, podzols |

T(°C) : température annuelle moyenne en degré celsius. P(mm) : précipitation annuelle moyenne en millimètre

Tableau A.3 Significations des codes

| Code | Signification |
|---------------------|---|
| E2(PG, AB) | PEP des pinèdes grises assignées à l'écocoréon des terres boréales du Nord de l'Alberta |
| E3(PG, AB) | PEP des pinèdes grises assignées à l'écocoréon de la forêt boréale mixte de l'Alberta |
| E4(PG, AB) | PEP des pinèdes grises assignées à l'écocoréon des contreforts de l'Alberta |
| E5(PG, QC) | PEP des pinèdes grises assignées à l'écocoréon québécoise : Taïga du sud de la baie James |
| E6(PG, QC) | PEP des pinèdes grises assignées à l'écocoréon québécoise : Forêts centrales du bouclier canadien |
| E7(PG, QC) | PEP des pinèdes grises assignées à l'écocoréon québécoise : Forêt du l'Est canadien |
| E8(PG, QC) | PEP des pinèdes grises assignées à l'écocoréon québécoise : Forêt transitionnelle de l'Est |
| E2(EPN, AB) | PEP des épinettes noires assignées à l'écocoréon des terres boréales du Nord de l'Alberta |
| E3(EPN, AB) | PEP des épinettes noires assignées à l'écocoréon de la forêt boréale mixte de l'Alberta |
| E4(EPN, AB) | PEP des épinettes noires assignées à l'écocoréon des contreforts de l'Alberta |
| E5(EPN, AB) | PEP des épinettes noires assignées à l'écocoréon des hautes terres boréales de l'Alberta |
| E5(EPN, QC) | PEP des épinettes noires assignées à l'écocoréon québécoise : Taïga du sud de la baie James |
| E6(EPN, QC) | PEP des épinettes noires assignées à l'écocoréon québécoise : Forêts centrales du bouclier canadien |
| E7(EPN, QC) | PEP des épinettes noires assignées à l'écocoréon québécoise : Forêt du l'Est canadien |
| E8(EPN, QC) | PEP des épinettes noires assignées à l'écocoréon québécoise : Forêt transitionnelle de l'Est |
| E9(EPN, QC) | PEP des épinettes noires assignées à l'écocoréon québécoise : Forêts des basses terres de l'Est des grands lacs |
| E10(EPN, QC) | PEP des épinettes noires assignées à l'écocoréon québécoise : Forêts de la Nouvelle Angleterre et de l'Acadie |

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Achuff, Peter L. 1994. *Natural regions, subregions and natural history themes of Alberta: A classification for protected areas management*: The Services p.
- Alberta Environmental protection. 1994. «Natural regions of Alberta». *Publ. No I/531. Alberta Environmental Protection, Edmonton, Alberta.*
- Alberta Forest Conservation Strategy steering committee. 1997. «Alberta forest conservation strategy». *Alberta Environmental Protection, Edmonton, Alberta, Canada.* En ligne. <http://www.borealcentre.ca/reports/afcs.html%3E>. Consulté le 5 Décembre 2010.
- Alberta Natural Regions Committee. 2006. «Natural regions and subregions of Alberta». *Compiled by DJ Downing and WW Pettapiece. Government of Alberta, Edmonton, AB. Publ.*
- Arcangeli, C, M Klopf, SE Hale, TAR Jenkins et H Hasenauer. 2013. «The uniform height curve method for height–diameter modelling: an application to Sitka spruce in Britain». *Forestry*, p. cpt041.
- Archibald, JH, Grant David Klappstein et Ian George William Corns. 1996. *Field guide to ecosites of southwestern Alberta*: University of British Columbia Press p.
- Assmann, Ernst. 1970. «The principles of forest yield study. Studies in the organic production, structure, increment and yield of forest stands». *The principles of forest yield study. Studies in the organic production, structure, increment and yield of forest stands.*
- Avery, Thomas Eugene, et Harold E Burkhart. 1983. *Forest measurements*, no Ed. 3: McGraw-Hill Book Company p.

- Béland, Martin, Yves Bergeron et Richard Zarnovican. 2003. «Harvest treatment, scarification and competing vegetation affect jack pine establishment on three soil types of the boreal mixed wood of northwestern Quebec». *Forest Ecology and Management*, vol. 174, no 1, p. 477-493.
- Benzie, Alexandra. 2013. «Canopy Height Modeling for Improved Forest Biomass Inventory». Environmental Studies Graduate Projects Queen's Graduate Projects. En ligne. <<http://hdl.handle.net/1974/8275%3E>.
- Bouchon, J. 1995. «Concepts et caractéristiques des divers modèles de croissance». *Revue Forestière Française*, 1995, 5, fascicule thématique "Modélisation de la croissance des arbres forestiers et de la qualité des bois".
- Brandt, James Peter. 1998. *Distribution of severe dwarf mistletoe damage in west-central Canada*: Canadian Mus of Civilization p.
- Brooks, J Renée, Lawrence B Flanagan et James R Ehleringer. 1998. «Responses of boreal conifers to climate fluctuations: indications from tree-ring widths and carbon isotope analyses». *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 28, no 4, p. 524-533.
- Burkhart, Harold E, Robert C Parker, Mike R Strub et Richard G Oderwald (1972). Yields of old~ field loblolly pine plantations. Div. Forestry and Wildlife Resources, VPI & SU, FWS-3-72
- Calama, Rafael, et Gregorio Montero. 2004. «Interregional nonlinear height diameter model with random coefficients for stone pine in Spain». *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 34, no 1, p. 150-163.
- Case, Bradley S, et Ronald J Hall. 2008. «Assessing prediction errors of generalized tree biomass and volume equations for the boreal forest region of west-central Canada». *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 38, no 4, p. 878-889.
- Cayford, JH, DJ McRae, RW Wein et DA Maclean. 1983. «The ecological role of fire in jack pine forests».
- Chapman, Douglas G. 1961. *Statistical problems in dynamics of exploited fisheries populations: Proc. 4th Berkeley Symp. on Mathematics, Statistics and Probability*. 153-168 p.

- Clutter, Jerome L, James C Fortson, Leon V Pienaar, Graham H Brister et Robert L Bailey. 1983. *Timber management: a quantitative approach*: Wiley New York p.
- Curtis, Robert O. 1967. «Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir». *Forest science*, vol. 13, no 4, p. 365-375.
- Dang, Qing-Lai, et Song Cheng. 2004. «Effects of soil temperature on ecophysiological traits in seedlings of four boreal tree species». *Forest Ecology and Management*, vol. 194, no 1, p. 379-387.
- Day, RJ, et DM Nanang. 1996. *Principles of thinning for improved growth, yield and economic profitability of lodgepole and jack pine: Proc. of a Commercial Thinning Workshop. Whitecourt, Alberta.* 1-12 p.
- Dhôte, J.F (1987). *Modèles de croissance des peuplements forestiers*. Lyon, université Claude Bernard
- Dorado, Fernando Castedo, Marcos Barrio Anta, Bernard R Parresol et Juan Gabriel Álvarez González. 2005. «A stochastic height-diameter model for maritime pine ecoregions in Galicia (northwestern Spain)». *Annals of forest science*, vol. 62, no 5, p. 455-465.
- Duchesne, Isabelle. 2006. «Effect of rotation age on lumber grade yield, bending strength and stiffness in Jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) natural stands». *Wood and fiber science*, vol. 38, no 1, p. 84-94.
- Duchesne, Louis, et Rock Ouimet. 2008. «Population dynamics of tree species in southern Quebec, Canada: 1970–2005». *Forest Ecology and Management*, vol. 255, no 7, p. 3001-3012.
- Environment and Sustainable Resource Development (2005). Alberta permanent sample plot field procedures manual. Public Lands and Forests Division 8th FL, 9920-108 Street Edmonton, AB. T5K 2M4, Forest Management Branch En ligne. <<http://www.srd.alberta.ca/ManagingPrograms/ForestManagement/PermanentSamplePlots/ForestManagementBranchPSPManuals.aspx>>. Consulté le 22 Novembre 2010.

- Epstein, Rafael, Enrique Nieto, Andres Weintraub, Philippe Chevalier et J Gabarró. 1999. «A system for the design of short term harvesting strategy». *European journal of operational research*, vol. 119, no 2, p. 427-439.
- Fang, Zixing, et RL Bailey. 1998. «Height-diameter models for tropical forests on Hainan Island in southern China». *Forest Ecology and Management*, vol. 110, no 1, p. 315-327.
- Farrar, John Laird. 1995. «Trees in Canada». *Markham, Ontario: Fitzhenry and Whiteside and Canadian Forest Service x, 502p.-illus., col. illus.. ISBN*, vol. 1550411993.
- Feldpausch, TR, L Banin, OL Phillips, TR Baker, SL Lewis, CA Quesada, K Affum-Baffoe, EJMM Arets, NJ Berry et Michael Bird. 2011. «Height-diameter allometry of tropical forest trees». *Biogeosciences*, vol. 8, no 5, p. 1081-1106.
- Flanagan, PW, et K Van Cleve. 1977. «Microbial biomass, respiration and nutrient cycling in a black spruce taiga ecosystem». *Ecological Bulletins*, p. 261-273.
- Fortin, Mathieu, Sylvain Bernier, Jean-Pierre Saucier et François Labbé. 2009. *relation hauteur-diamètre tenant compte de l'influence de la station et du climat pour 20 espèces commerciales du Québec*: Ministère des ressources naturelles et de la faune, Direction de la recherche forestière p.
- Gagnon, Réjean, et Hubert Morin. 2001. «Les forêts d'épinette noire du Québec: dynamique, perturbations et biodiversité». *Nat. Can*, vol. 125, p. 26-35.
- Girardin, MP, XJ Guo, PY Bernier, F Raulier et S Gauthier. 2012. «Changes in growth of pristine boreal North American forests from 1950 to 2005 driven by landscape demographics and species traits». *Biogeosciences Discussions*, vol. 9, no 1, p. 1021-1053.
- Google Earth (2012). Version 6.2.1.6014 (beta). En ligne.
<http://www.01net.com/telecharger/%3E>.
- Houllier, F, J Bouchon et Y Birot. 1991. «Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers: état et perspectives».

- Huang, S. 1994. «Ecologically based individual tree volume estimation for major Alberta tree species». *Report to Alberta Environmental Protection, Land and Forest Services, Forest Management Division, Edmonton, Alta.*
- Huang, Shongming. 1999. «Ecoregion-based individual tree height-diameter models for lodgepole pine in Alberta». *Western Journal of Applied Forestry*, vol. 14, no 4, p. 186-193.
- Huang, Shongming, Daryl Price et Stephen Titus. 2000. «Development of ecoregion-based height-diameter models for white spruce in boreal forests». *Forest Ecology and Management*, vol. 129, no 1, p. 125-141.
- Huang, Shongming, Stephen J Titus, Grant Klappstein et Alberta Land. 1997. *Development of a subregion-based compatible height-site index-age model for young and mature lodgepole pine in Alberta*: Alberta Environmental Protection, Land and Forest Service, Forest Management Division p.
- Huang, Shongming, Stephen J Titus et Douglas P Wiens. 1992. «Comparison of nonlinear height-diameter functions for major Alberta tree species». *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 22, no 9, p. 1297-1304.
- Ige, PO, GO Akinyemi et AS Smith. 2013. «Nonlinear growth functions for modeling tree height-diameter relationships for *Gmelina arborea* (Roxb.) in south-west Nigeria». *Forest Science and Technology*, vol. 9, no 1, p. 20-24.
- Jenny, Hans. 1941. *Factors of soil formation*: McGraw-Hill Book Company New York, NY, USA p.
- Johnson, NL. 1949. «Bivariate distributions based on simple translation systems». *Biometrika*, vol. 36, no 3/4, p. 297-304.
- Journel, Andre G, et Charles J Huijbregts. 1978. *Mining geostatistics*: Academic press London p.
- Kankare, Ville, Markus Holopainen, Mikko Vastaranta, Eetu Puttonen, Xiaowei Yu, Juha Hyypä, Matti Vaaja, Hannu Hyypä et Petteri Alho. 2013. «Individual tree biomass estimation using terrestrial laser scanning». *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 75, p. 64-75.

- Lambert, MC, CH Ung et Frédéric Raulier. 2005. «Canadian national tree aboveground biomass equations». *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 35, no 8, p. 1996-2018.
- Larsen, David R, et David W Hann. 1987. «Height-diameter equations for seventeen tree species in southwest Oregon».
- Law, Kwei-Nam, et Jacques L Valade. 1994. «Status of the utilization of jack pine (*Pinus banksiana*) in the pulp and paper industry». *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 24, no 10, p. 2078-2084.
- Levenberg, Kenneth. 1944. «A method for the solution of certain problems in least squares». *Quarterly of applied mathematics*, vol. 2, p. 164-168.
- Lynch, Thomas B, Kenneth L Hitch, Michael M Huebschmann et Paul A Murphy. 1999. «An individual-tree growth and yield prediction system for even-aged natural shortleaf pine forests». *Southern Journal of Applied Forestry*, vol. 23, no 4, p. 203-211.
- Lynch, Thomas B, et Paul A Murphy. 1995. «A compatible height prediction and projection system for individual trees in natural, even-aged shortleaf pine stands». *Forest science*, vol. 41, no 1, p. 194-209.
- Major, Jack. 1951. «A functional, factorial approach to plant ecology». *Ecology*, vol. 32, no 3, p. 392-412.
- Marquardt, Donald W. 1963. «An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters». *Journal of the Society for Industrial & Applied Mathematics*, vol. 11, no 2, p. 431-441.
- Marshall, Ian B, CA Scott Smith et Corrine J Selby. 1996. «A national framework for monitoring and reporting on environmental sustainability in Canada». *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 39, no 1-3, p. 25-38.
- Marshall, IB, et PH Schut. 1999. «Un cadre écologique national pour le Canada». *Environnement Canada, Direction générale de la science des écosystèmes, et*

Agriculture et Agroalimentaire Canada, Direction de la recherche. Ottawa (Ontario).

Mason, Euan G (2004). A brief review of the impact of stand density on variables affecting radiata pine stand value

Ministère des ressources naturelles du Québec (2009). Les placette-échantillons En ligne. <http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-inventaire-placettes.jsp%3E%3E>. Consulté le 5 Avril 2011.

----- (2012). RESSOURCES ET INDUSTRIES FORESTIÈRES-PORTRAIT STATISTIQUE ÉDITION 2012. Direction du développement de l'industrie des produits forestiers. 880, chemin Sainte-Foy. Québec (Québec) G1S 4X4. CANADA En ligne. <http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/portrait-statistique-2012.pdf%3E>. Consulté le 29 Décembre 2012.

Molto, Q, B Héroult, J-J Boreux, M Daullet, A Rousteau et V Rossi. 2013. «Predicting tree heights for biomass estimates in tropical forests». *Biogeosciences Discussions*, vol. 10, no 5, p. 8611-8635.

Moore, James A, Lianjun Zhang et Dean Stuck. 1996. «Height-diameter equations for ten tree species in the Inland Northwest». *Western Journal of Applied Forestry*, vol. 11, no 4, p. 132-137.

MRNF (2007). Ressources et industries forestières -portrait statistique

Nanos, Nikos, Rafael Calama, Gregorio Montero et Luis Gil. 2004. «Geostatistical prediction of height/diameter models». *Forest Ecology and Management*, vol. 195, no 1, p. 221-235.

Oliver, Chadwick Dearing, et Bruce C Larson. 1990. *Forest stand dynamics*: McGraw-Hill, Inc. p.

Pavé, Alain. 1994. *Modélisation en biologie et en écologie*: Aléas p.

Peng, Changhui. 1999. «Nonlinear height-diameter models for nine boreal forest tree species in Ontario». *Forest Research Report Ontario Forest Research Institute*.

- Peng, Changhui, Lianjun Zhang et Junxun Liu. 2001. «Developing and validating nonlinear height-diameter models for major tree species of Ontario boreal forests». *Northern Journal of Applied Forestry*, vol. 18, no 3, p. 87-94.
- Peng, Changhui, Lianjun Zhang, Xiaolu Zhou, Qinglai Dang et Shongming Huang. 2004. «Developing and evaluating tree height-diameter models at three geographic scales for black spruce in Ontario». *Northern Journal of Applied Forestry*, vol. 21, no 2, p. 83-92.
- Peng, Changhui., Lianjun Zhang, Shongming Huang, Xiaolu Zhou, John Parton et Murray Woods. 2001. *Developing Ecoregion-Based Height-Diameter Models for Jack Pine and Black Spruce in Ontario*, 159 p. Ontario: Ontario Forest Research Institute, 10 p.
- Pothier, D, et F Savard. 1998. «Actualisation des tables de production pour les principales espèces forestières québécoises se développant en peuplements purs et réguliers». *Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles du Québec, Direction de la recherche forestière, Sainte-Foy, Qc.*
- Rankin, Rob, M Austin et J Rice. 2012. *Ecological classification system for the ecosystem status and trends report*: Canadian Councils of Resource Ministers p.
- Richards, FJ. 1959. «A flexible growth function for empirical use». *Journal of experimental Botany*, vol. 10, no 2, p. 290-301.
- Rijal, Baburam, Aaron R Weiskittel et John A Kershaw. 2012. «Development of regional height to diameter equations for 15 tree species in the North American Acadian Region». *Forestry*, vol. 85, no 3, p. 379-390.
- Robinson, Andrew P, et William R Wykoff. 2004. «Imputing missing height measures using a mixed-effects modeling strategy». *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 34, no 12, p. 2492-2500.
- Sabatia, Charles O, et Harold E Burkhart. 2013. «Height and Diameter Relationships and Distributions in Loblolly Pine Stands of Enhanced Genetic Material». *Forest science*, vol. 59, no 3, p. 278-289.

Sánchez, Carlos A López, Javier Gorgoso Varela, Fernando Castedo Dorado, Alberto Rojo Alboreca, Roque Rodríguez Soalleiro, Juan Gabriel Álvarez González et Federico Sánchez Rodríguez. 2003. «A height-diameter model for *Pinus radiata* D. Don in Galicia (Northwest Spain)». *Annals of forest science*, vol. 60, no 3, p. 237-245.

SAS Institute (2009). SAS Web Report Studio 4. 2: User's Guide, Sas Institute

Saucier, Jean-Pierre, Jean-François Bergeron, Pierre Grondin et André Robitaille. 1998. «Les régions écologiques du Québec méridional (3e version): un des éléments du système hiérarchique de classification écologique du territoire mis au point par le ministère des Ressources naturelles du Québec». *l'Aubelle*, vol. 124, p. 1-12.

Scaranello, Marcos Augusto da Silva, Luciana Ferreira Alves, Simone Aparecida Vieira, Plinio Barbosa de Camargo, Carlos Alfredo Joly et Luiz Antônio Martinelli. 2012. «Height-diameter relationships of tropical Atlantic moist forest trees in southeastern Brazil». *Scientia Agricola*, vol. 69, no 1, p. 26-37.

Schröder, Jörg, et Juan Gabriel Álvarez González. 2001. «Comparing the performance of generalized diameter-height equations for maritime pine in Northwestern Spain». *Forstwissenschaftliches Centralblatt vereinigt mit Tharandter forstliches Jahrbuch*, vol. 120, no 1-6, p. 18-23.

Sharma, Mahadev, et Yin Shu Zhang. 2004. «Height-diameter models using stand characteristics for *Pinus banksiana* and *Picea mariana*». *Scandinavian journal of forest research*, vol. 19, no 5, p. 442-451.

Sims, RA, Helen Maureen Kershaw et GM Wickware. 1990. *The autecology of major tree species in the north central region of Ontario*, no 3302: Forestry Canada, Ontario Region, Great Lakes Forest Research Centre p.

Soares, Paula, et Margarida Tomé. 2002. «Height-diameter equation for first rotation eucalypt plantations in Portugal». *Forest Ecology and Management*, vol. 166, no 1, p. 99-109.

SPBAT (2000). Plan régional de protection et de mise en valeur des forêts privées de l'agence de l'Abitibi: Calcul des possibilités forestières. Rapport 2

- Strong, WL, et Keith R Leggat. 1992. «Ecoregions of Alberta. Alberta Forestry, Lands, and Wildlife, Land Information Division». *Resource Information Branch, Edmonton, Alberta*.
- Tarnocai, C, et B Lacelle. 1996. «Soil organic carbon digital database of Canada». *Eastern Cereal and Oilseed Research Centre, Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa.(database)*.
- Temesgen, H, et K v Gadow. 2004. «Generalized height-diameter models—an application for major tree species in complex stands of interior British Columbia». *European Journal of Forest Research*, vol. 123, no 1, p. 45-51.
- Trincado, Guillermo, Curtis L VanderSchaaf et Harold E Burkhart. 2007. «Regional mixed-effects height-diameter models for loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations». *European Journal of Forest Research*, vol. 126, no 2, p. 253-262.
- Ung, Chhun-Huor, Pierre Bernier et Xiao-Jing Guo. 2008. «Canadian national biomass equations: new parameter estimates that include British Columbia data». *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 38, no 5, p. 1123-1132.
- Vanclay, Jerome K. 1994. «Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests». *School of Environmental Science and Management Papers*, p. 537.
- Viereck, Leslie A, et William F Johnston. 1990. «*Picea mariana* (Mill.) BSP black spruce». *Silvics of North America*, vol. 1, no 654, p. 227.
- Walther, Gian-Reto, Eric Post, Peter Convey, Annette Menzel, Camille Parmesan, Trevor JC Beebee, Jean-Marc Fromentin, Ove Hoegh-Guldberg et Franz Bairlein. 2002. «Ecological responses to recent climate change». *Nature*, vol. 416, no 6879, p. 389-395.
- Welke, Sylvia, et James William Fyles. 2005. *When texture matters: Compaction in Boreal forest soils: Sustainable Forest Management Network* p.
- Westfall, James A, Harold E Burkhart et Allen H Lee. 2004. «Young stand growth modeling for intensively-managed loblolly pine plantations in Southeastern US». *Forest science*, vol. 50, no 6, p. 823-835.

- Wiken, Ed B. 1986. *Terrestrial ecozones of Canada*: Environment Canada, Lands Directorate p.
- Wykoff, William R, Nicholas L Crookston et Albert R Stage. 1982. *User's guide to the stand prognosis model*: US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station p.
- Zeide, Boris, et Curtis Vanderschaaf. 2002. «The effect of density on the height-diameter relationship». *Notes*.
- Zhang, L, JA Moore et JD Newberry. 1995. *Evaluation of the prediction performance for eight nonlinear height-diameter equations: Poster presented at the Resources Measurement subject area at the SAF National Convention held in Portland, Main, October*. 447-448 p.
- Zhang, Lianjun. 1997. «Cross-validation of non-linear growth functions for modelling tree height-diameter relationships». *Annals of Botany*, vol. 79, no 3, p. 251-257.
- Zhang, Shaoang, Harold E Burkhart et Ralph L Amateis. 1997. «The influence of thinning on tree height and diameter relationships in loblolly pine plantations». *Southern Journal of Applied Forestry*, vol. 21, no 4, p. 199-205.
- Zhang, SY, et Ahmed Koubaa. 2009. *Les résineux de l'Est du Canada: écologie forestière, caractéristiques, transformation et usages*: FPIinnovations p.